

# 核融合発電所の将来電力系統への受容性に関する研究

武田 秀太郎

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b> .....	<b>14</b>
1.1	本論文の背景 .....	14
1.1.1	人類の生存とエネルギー .....	14
1.1.2	21世紀の人類に求められるもの：Jevons Paradox を超えて .....	16
1.1.3	核融合反応を通じた革新的エネルギー変換 .....	16
1.1.4	核融合反応による発電の実現へと向けた研究 .....	17
1.1.5	核融合発電所の実用化へ向けた課題 .....	18
1.2	本論文の目的 .....	20
1.3	本論文の構成 .....	21
<b>2</b>	<b>電力系統</b> .....	<b>22</b>
2.1	人類と電力 .....	22
2.1.1	エネルギー黎明期 .....	22
2.1.2	電力と生活の質 .....	22
2.2	電力市場の現状並びに将来像 .....	24
2.2.1	電力市場の現状 .....	24
2.2.2	電力市場の将来像 .....	25
2.3	電力系統とその安定性 .....	29
2.3.1	電力系統の特性 .....	29
2.3.2	電力系統の安定性 .....	30
2.4	結言 .....	35

<b>3</b>	<b>核融合発電所.....</b>	<b>36</b>
3.1	核融合発電所の概要.....	36
3.1.1	核融合発電所の構成.....	36
3.1.2	核融合発電所の運転方式.....	39
3.1.3	核融合発電所の環境負荷.....	39
3.1.4	核融合発電所の安全性.....	40
3.1.5	核融合発電所の核拡散抵抗性.....	40
3.2	核融合発電プラント設計レビュー.....	41
3.2.1	Demo-CREST.....	41
3.2.2	SlimCS.....	43
3.2.3	EU DEMO.....	45
3.3	結言.....	46
<b>4</b>	<b>プラズマディスラプション発生時における核融合発電所挙動.....</b>	<b>48</b>
4.1	導入.....	48
4.1.1	核融合発電所における発電システム検討の必要性.....	48
4.1.2	本章の目的.....	51
4.1.3	先行研究.....	51
4.2	方法.....	52
4.2.1	核融合発電所シミュレーションモデルのシステムパラメータ設定.....	52
4.2.2	核融合発電所シミュレーションモデル構築環境.....	53
4.3	核融合発電所シミュレーションモデル.....	54
4.3.1	核融合炉モデル.....	54
4.3.2	一次冷却系モデル.....	57
4.3.3	蒸気発生器モデル.....	57
4.3.4	給水加熱器モデル.....	59

4.3.5	スチームシステム（二次冷却系）モデル .....	61
4.3.6	制御系モデル .....	62
4.3.7	シミュレータ条件 .....	62
4.4	結果 .....	63
4.4.1	定常運転時における核融合発電所挙動 .....	63
4.4.2	プラズマディスラプション発生時の核融合発電所挙動 .....	63
4.5	考察 .....	66
4.5.1	定常時発電システム条件の PWR との比較 .....	66
4.5.2	プラズマディスラプション発生時における核融合発電所運用シナリオ .....	66
4.5.3	本核融合発電所シミュレーションモデルにかかる今後の課題 .....	67
4.6	結言 .....	68
<b>5</b>	<b>電力系統過渡安定度にかかる核融合発電所導入制約の検討 .....</b>	<b>70</b>
5.1	導入 .....	70
5.1.1	電力系統への受容性に関する課題 .....	70
5.1.2	本章の目的 .....	70
5.1.3	先行研究 .....	71
5.2	方法 .....	72
5.2.1	電力系統過渡安定度評価モデル構築にかかる要求 .....	72
5.2.2	Heffron-Philips モデルに基づく電力系統過渡安定度評価モデルの構築 .....	73
5.2.3	電中研 Y 法との比較による評価モデル妥当性の検証 .....	82
5.3	結果 .....	84
5.3.1	電力系統容量並びに構成 .....	84
5.3.2	代表的条件下における電力系統周波数挙動 .....	85
5.3.3	再生可能エネルギーの導入下における電力系統周波数挙動 .....	86
5.3.4	原子力発電所の導入下における電力系統周波数挙動 .....	88

5.3.5	再生可能エネルギー並びに原子力発電所の導入下における電力系統過渡安定度への影響.....	89
5.4	考察.....	92
5.4.1	電力系統過渡安定度にかかる核融合発電所の導入制約.....	92
5.4.2	結果の低次元化.....	93
5.4.3	S-t Diagram.....	96
5.4.4	本章において開発された電力系統過渡安定度評価モデルにかかる制約.....	97
5.5	結言.....	97
<b>6</b>	<b>核融合発電所運用にかかる電力系統過渡安定度改善手法の検討.....</b>	<b>99</b>
6.1	導入.....	99
6.1.1	電力系統過渡安定度への影響改善の必要性.....	99
6.1.2	本章の目的.....	99
6.1.3	先行研究.....	100
6.2	蓄熱装置による緩和.....	101
6.2.1	概要.....	101
6.2.2	設計.....	102
6.2.3	評価方法.....	103
6.2.4	結果.....	103
6.2.5	考察.....	106
6.3	蓄電装置による緩和.....	106
6.3.1	概要.....	106
6.3.2	設計.....	107
6.3.3	評価方法.....	108
6.3.4	結果.....	110
6.3.5	考察.....	111

6.4	緩和装置導入の実現性にかかる考察.....	116
6.4.1	蓄熱装置導入の実現性.....	116
6.4.2	蓄電装置導入の実現性.....	118
6.5	結言.....	120
<b>7</b>	<b>核融合発電所の自由化電力市場への経済的導入戦略.....</b>	<b>122</b>
7.1	導入.....	122
7.1.1	核融合発電所の将来導入戦略.....	122
7.1.2	将来電力市場における核融合発電所.....	122
7.1.3	本章の目的.....	125
7.1.4	先行研究.....	125
7.2	方法.....	126
7.2.1	簡易化 PJM 市場モデル.....	126
7.2.2	核融合発電所運用シナリオ.....	133
7.2.3	経済性試算手法.....	136
7.3	結果.....	136
7.3.1	ライフサイクルコスト.....	136
7.3.2	売電収入.....	137
7.3.3	インバランス料金.....	138
7.3.4	アンシラリーサービス収支.....	139
7.3.5	現在試算価値試算.....	140
7.4	考察.....	145
7.4.1	核融合発電所の自由化電力市場における経済的戦略.....	145
7.4.2	最適売電市場にかかる考察.....	145
7.4.3	最適緩和手法にかかる考察.....	149
7.5	結言.....	152

8 結論 .....	154
謝辭 .....	159
関連業績 .....	160
参考文献 .....	166

## List of Figures

Figure 1-1 Predicted Shares of Primary Energy Sources to 2040. ....	15
Figure 1-2 "Hydrogen Transmutation Effect" Observed by M. L. E. Oliphant, P. Harteck and Lord Rutherford (1934) [12].....	18
Figure 2-1 Average Life Expectancy vs. Electricity Use per Capita [24]. ....	23
Figure 2-2 UN Human Development Index vs. Electricity Use per Capita [25].....	23
Figure 2-3 Illustration of TSO / ISO Unbundling (modified by the author from [28]). .....	26
Figure 2-4 Histogram of Population against Accessible Electrical Grid Capacity (Illustrated by the author [31], data based on [32, 33]).....	27
Figure 2-5 Comparison of Renewable and Nuclear Generation Shares in 2012 and 2040 (Illustrated by the author [34], data based on [35]).....	28
Figure 2-6 Illustration of Typical Power System Load Behaviors [41]. ....	32
Figure 2-7 Illustration of Frequency Control Measures [43]. ....	33
Figure 2-8 Utility Frequency Behavior of the Cascading Power System Failure in Malaysia, 1996 [40].....	34
Figure 3-1 Comparison of Tokamak and Helical System [45]. ....	37
Figure 3-2 ITER Tokamak and Plant Systems [47]. ....	37
Figure 3-3 Cross-section Bird's-eye View of Demo-CREST [62]. ....	42
Figure 3-4 Cross-section Bird's-eye View of SlimCS [65]. ....	43
Figure 3-5 Electricity Generation System Design of SlimCS [64].....	44
Figure 3-6 Electricity Generation System Design of EU DEMO [68, 69].....	46
Figure 4-1 Typical Waveforms of a Relatively Fast Disruption (Modified from [75]). .....	49
Figure 4-2 Plant Diagram of the Simulated Nuclear Fusion Power Plant [87, 88].....	53
Figure 4-3 Cross-section Diagram of the Blanket Model. [87, 92]. ....	54

Figure 4-4 Nuclear Heating, Decay Heat and the Thermal Radiation of the Blanket Model [87, 97-99].	56
Figure 4-5 Modelica Model of the Blanket.	56
Figure 4-6 Cross-section Diagram of U-tube Steam Generator Model [101, 102].	58
Figure 4-7 Modelica Model of the U-tube Steam Generator [90].	59
Figure 4-8 Modelica Model of the Shell-and-tube Heater [90].	60
Figure 4-9 Modelica Model of the Nuclear Fusion Power Plant.	61
Figure 4-10 A Screenshot of Dymola Simulation and Modeling Environment.	62
Figure 4-11 Steady-state Operating Conditions of the Primary/Secondary Coolant.	63
Figure 4-12 Plant Behavior upon Disruption. (a) Primary Coolant Temperature (b) Electrical Output	64
Figure 4-13 Water Level at Steam Generator upon Disruption (Normal Response).	64
Figure 4-14 Water Level at Steam Generator upon Disruption (Fast Response).	65
Figure 5-1 Illustration of the Power System Model.	74
Figure 5-2 A Screenshot of Matlab/Simulink Modeling and Simulation Environment.	74
Figure 5-3 Block Diagram of the Heffron-Philips Model [31].	75
Figure 5-4 Block Diagram of the Power Plant Models [112].	76
Figure 5-5 Assumed Location Sites of Renewable Power Sources.	79
Figure 5-6 Wind Turbine Model (VTE Vestas V90 2.0MW) [121].	79
Figure 5-7 Solar Radiation Estimation Method (Modified by the Author, Presented by Yoshimitsu et al. [122]).	80
Figure 5-8 Generation Characteristics of Solar and Wind [34].	80
Figure 5-9 Block Diagram of the LFC Model [31].	81
Figure 5-10 Block Diagram of the Power System Model [31].	82
Figure 5-11 Reference Grid Configuration [112].	82
Figure 5-12 Load Pattern of the Reference Scenario.	83

Figure 5-13 Comparison of Reference Scenario Results [31, 112].....	83
Figure 5-14 Utility Frequency Behavior of Japan East System 2040 Case.....	85
Figure 5-15 Utility Frequency Behavior under the Effect of Renewable Power Sources [34].....	86
Figure 5-16 Utility Frequency Behavior under the Effect of Renewable Generation Fluctuation in the Last 10 Minutes.....	87
Figure 5-17 Utility Frequency Behavior under the Effect of Nuclear Power Plant [34].....	88
Figure 5-18 Peak Frequency Deviation under the Effect of Renewable and Nuclear Power Sources; Comparison of Fusion Plant Output [34].....	90
Figure 5-19 Peak Frequency Deviation under the Effect of Renewable and Nuclear Power Sources; Comparison of Grid Size.....	91
Figure 5-20 Indicated Limitation of Fusion Plant Installation for a 90 GW Grid [34]. .....	93
Figure 5-21 Summarized Simulation Results on $S_{\text{grid}}-\tau$ Plane [34].....	95
Figure 5-22 The S-t Diagram [34].....	96
Figure 6-1 Cross-section Diagram of the Heat Storage-filled U-tube Steam Generator.....	102
Figure 6-2 Modelica Model of the Heat Storage-filled U-tube Steam Generator. ....	103
Figure 6-3 Water Level at the Heat Storage-filled Steam Generator upon Disruption. .....	104
Figure 6-4 Plant Behavior with the Heat Storage-filled Steam Generator. (a) Primary Coolant Temperature (b) Electrical Output .....	105
Figure 6-5 Frequency Behavior with and without Heat Storage.....	105
Figure 6-6 Illustration of the Mitigation with Energy Storages. ....	107
Figure 6-7 Illustration of the Power System Model with an Energy Storage. ....	108
Figure 6-8 Block Diagram of the Energy Storage Model [31, 41].....	109

Figure 6-9 LFC Signal to the Energy Storage upon Disruption.....	109
Figure 6-10 Block Diagram of the Power System Model with an Energy Storage [31]. .....	110
Figure 6-11 Utility Frequency Behavior upon Disruption with an Energy Storage Installed [129]. .....	111
Figure 6-12 Required Battery Output, S-T Diagram ( $P_{out} = 1,200$ MW).....	112
Figure 6-13 Required Battery Output, $P_{out}$ -Gsize ( $\tau = 0.05$ ).....	113
Figure 6-14 Simulation Results (Dot) vs. Prediction Model (Mesh).....	115
Figure 6-15 Plant Building Design of SlimCS [64]. .....	117
Figure 6-16 Comparison of Capacity and Output of Electrical Energy Storages [135, 136]. .....	119
Figure 7-1 Illustration of Deregulated Electricity Market Mechanisms [28].....	124
Figure 7-2 PJM LMP Historical Data of Energy Market (PJM Node), 2015 [152]..	128
Figure 7-3 Year-Forward PJM Electricity Price Trends [156, 157]. .....	130
Figure 7-4 Comparison of the Life Cycle Cost of Mitigation Devices vs. the Nuclear Fusion Plant.....	137
Figure 7-5 Average Energy Market Revenues (Disruption Frequency = $0.00001$ /hour). .....	138
Figure 7-6 NPV of Nuclear Fusion Power Plant with Heat Storage.....	141
Figure 7-7 NPV of Nuclear Fusion Power Plant with NaS Battery. ....	142
Figure 7-8 NPV of Nuclear Fusion Power Plant with Outsourced Regulation Service. .....	143
Figure 7-9 Comparison of NPVs of Nuclear Fusion Power Plant with NaS Battery.	146
Figure 7-10 Optimal Energy Market Domains.....	147
Figure 7-11 Optimal Bidding Energy Market for Fusion Power Plant.....	148
Figure 7-12 Optimal Mitigation Measures on an Electricity Market without Adequate Ancillary Service Capacity. ....	150

Figure 7-13 Optimal Mitigation Measures on an Electricity Market with Adequate  
Ancillary Service Capacity. ....151

## List of Tables

Table 2-1 Electricity Access in 2013 - Regional Aggregates [26].....	24
Table 2-2 Frequency Control Targets on Various Systems (Japan and North America) [40].....	31
Table 4-1 Target Values of the Nuclear Fusion Power Plant System Parameters [87]. .....	53
Table 4-2 Parameters of the Blanket Model [87]. .....	55
Table 4-3 Parameters of the Primary Coolant Model.....	57
Table 4-4 Parameters of the U-tube Steam Generator Model [101, 102].....	58
Table 4-5 Parameters of the Shell-and-Tube Heater Model.....	60
Table 4-6 Parameters of the Steam System Model. ....	61
Table 4-7 Parameters of the Feed Water Pump Controller.....	62
Table 4-8 Comparison of Coolant Operating Conditions: Fusion vs. PWR Plant. ....	66
Table 5-1 Parameters of the Heffron-Philips Model. ....	76
Table 5-2 Parameters of the Power Plant Models [112].....	77
Table 5-3 Power System Configuration of two Reference Scenarios. ....	83
Table 5-4 Simulated Power System Compositions [34].....	84
Table 5-5 “Japan East System 2040”: Predicted East Japan Power System Composition in 2040 [73]. .....	85
Table 6-1 Design Parameters of the Heat Storage-filled U-tube Steam Generator..	102
Table 6-2 Power System Configuration with an Energy Storage.....	110
Table 6-3 Regression Results for $E_{\text{output}}$ . ....	114
Table 6-4 Parameters of Eq. 6-1.....	114
Table 7-1 Year-Forward PJM Electricity Forward Prices [\$/MWh] [156, 157]. ....	130
Table 7-2 Fusion Power Plant Operation Scenarios.....	133
Table 7-3 Required Mitigation Device Specifications. ....	134

Table 7-4 Estimated Nuclear Fusion Power Plant Cost. ....	135
Table 7-5 Estimated Heat Storage-filled Steam Generator Cost. ....	135
Table 7-6 Estimated NaS Battery Cost. ....	136
Table 7-7 Life Cycle Cost of the Nuclear Fusion Plant and Mitigation Devices. ....	137
Table 7-8 Energy Market Revenues (Disruption Frequency = 0.00001/hour).....	138
Table 7-9 Average Imbalance Payment per Plasma Disruption. ....	139
Table 7-10 Average Ancillary Service Revenue (RMCP = 20.35 \$/MWh, Disruption Frequency = 0.0001/hour).....	139

# 1 序論

## 1.1 本論文の背景

### 1.1.1 人類の生存とエネルギー

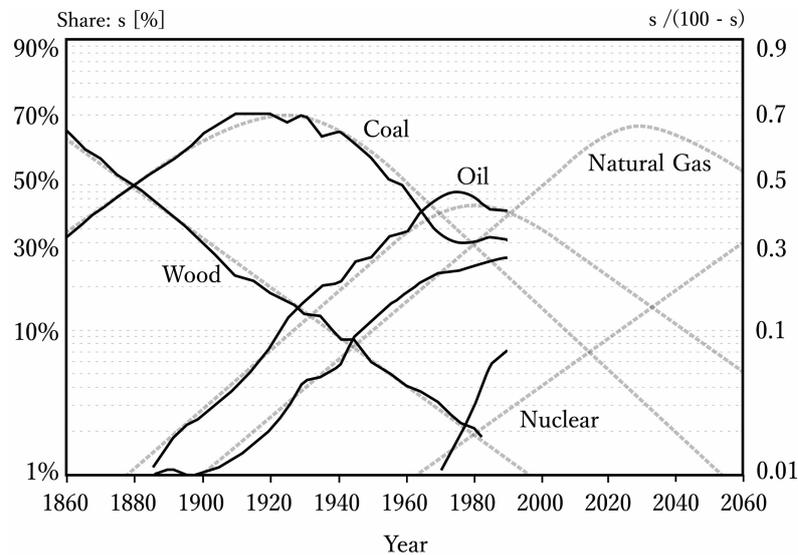
人類は誕生以来、その生存圏たる地球に存在する有限量の物質を循環させることで種としての生存を実現してきた。即ち人類は、エントロピーの低い物質を高い物質に絶え間なく変換し続けることで、その自己エントロピーの低減を実現し続けてきたのである。人類の生体活動とはブドウ糖に代表される低エントロピーの化学物質を取り込むことで体内のエントロピーを低く維持する活動である。そして人類文明の発展とは、大脳新皮質における化学物質の変換を通じ、生存圏内における情報論のエントロピーを減少させる過程である[1, 2]。

地球内において絶えず生じるこれら物質循環の駆動力こそが、エネルギーである。総量の不変なエネルギーについて、あるエネルギー形態を別のエネルギー形態に変換する過程で失われる自由エネルギーにより、物質循環は駆動される。しかしながら熱力学第二法則は、エネルギー変換による自由エネルギーの利用はその過程で必然的に系のエントロピーを増大させると規定する。このことは、人類の安定的生存における不可避の必要条件として、人類の生存圏内のエントロピーを増大させない条件が存在することを意味する[3]。

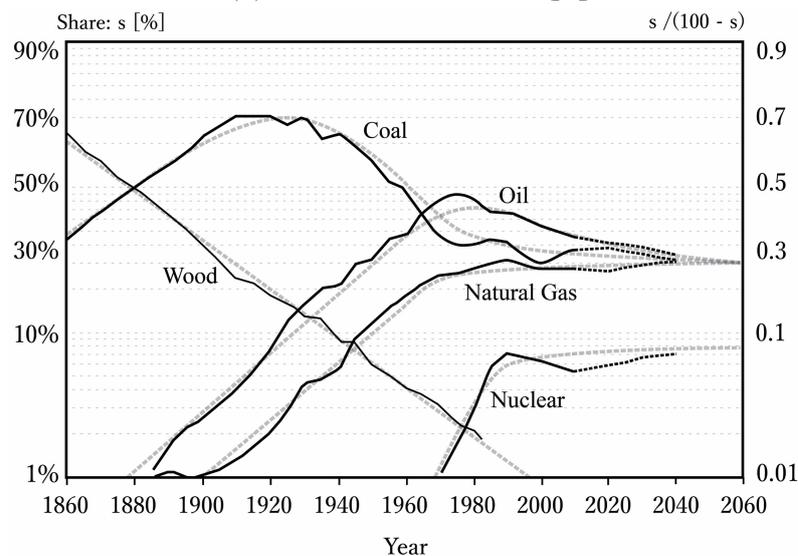
18世紀半ばより始まった産業革命は、人類のエネルギー形態変換様式と、それに必然的に伴うエントロピー増大様式を一変させた。蒸気機関の発明による運動エネルギー利用の刷新は、地質時代より数十億年の時をかけ蓄積された低エントロピー物質を酸化反応を通じ爆発的に消費する時代をもたらした。その後続いた熱機関の効率上昇はエネルギーコストの低下につながり、資源消費量は減少するどころかかえって増加の一途を辿った。資源消費量を  $Q$ 、その利用効率を  $e$  として  $\Delta Q/Q > \Delta e/e$  と表現されるこの現象は、Jevons による 1865 年の著書「The Coal Question [4]」において初めて論じられ、Jevons Paradox として知られることとなった。

産業革命による工業化は 20 世紀における科学技術の開花をもたらし、極めて短期間ではあるものの、人類が化石燃料からの脱却に楽観的であった時期が存在した。

1940年代の原子力発電の実用化、それに続く80年代以降の太陽光発電の一般化は、Figure 1-1 (a)に示す Marchetti (1991)の将来予測[5]に代表される「従来化石燃料からのエネルギー移行」という希望的観測をもたらした。しかしながら実際にその後の科学技術の発展がもたらしたものは、人口の爆発的増加と、一人あたり消費エネルギーのさらなる増加であった。結果世界におけるエネルギー総消費量は21世紀に入った後も加速度的に増大を続け、Figure 1-1 (b)に示す2015年時点における一次エネルギー源の将来予測[6]では、人類のエネルギー源の移行が今後最低でも数十年に渡り停滞することが明確に示唆されている。即ち、21世紀に至っても、未だ人類は Jevons Paradox により縛られているのである。



(a) Prediction in 1985 [5]



(b) Prediction in 2015 (Illustrated by the author, data based on IEA (2016) [6])

Figure 1-1 Predicted Shares of Primary Energy Sources to 2040.

## 1.1.2 21世紀の人類に求められるもの：Jevons Paradox を超えて

数世紀に渡る化石燃料の継続的燃焼がもたらしたものは人類社会における科学技術並びに生活の質の向上に留まらなかった。化石燃料の燃焼に由来する化学物質の一部が地球大気中に留まり、それらが予期しない形で人類の生存に重大な影響を及ぼす事態が生じたのである。特に二酸化炭素は放出から 1,000 年後においてもその 15 - 40%が大気中に滞留することが後に判明し、その大気濃度は産業革命から 200 年足らずで 50%近く増加した[7]。二酸化炭素は 300 - 1,000 nm の波長に対する光吸収強度がほぼゼロである一方、1,400 - 1,600 nm 付近においては高い吸収強度を示す[8]。これは太陽から地球に降り注ぐ可視光についてはほぼ吸収しない一方で、地表面から宇宙空間へ放出される赤外線についてはこれを吸収することを意味する。即ち、化石燃料の消費は、放出された二酸化炭素に由来する地球上の平均気温の上昇という、予期しない二次的な人類生存圏の中長期的エントロピー上昇効果を生じたのである。

低エントロピー物質の変換によるエントロピー増大〈資源埋蔵量の減少〉と、その燃焼により副次的に生じた平均気温上昇〈地球温暖化〉。この2つのエントロピー増大要因こそが、安定的な生存へ向け、21世紀中において克服されねばならない人類の最重要課題である。人類は科学技術のさらなる発展により Jevons Paradox を超え、能動的に安定相への到達を図らねばならない。そしてその中核となる試みこそが、エネルギー技術の革新を通し資源消費量並びに温室効果ガスの排出を同時に低減し、生存圏におけるエントロピーの増大なく物質循環を実現する努力である。

## 1.1.3 核融合反応を通じた革新的エネルギー変換

原子核を構成する核子は 1 核子あたり MeV オーダーの結合エネルギーを有している[9]。この結合エネルギーは、核子が結合を入れ替える核反応に際し、核子の運動エネルギーとして放出される。核反応には核分裂反応と核融合反応が存在し、このうち核融合反応とは、質量数の小さい 2 以上の原子核同士が融合し、より質量数の大きい 1 以上の原子核を生じる反応を言う。核融合反応には反応に関わる原子の種類により多くの種類が存在し、核融合炉において利用可能と考えられる反応としては Eq. 1-1, 1-2 に示す D-D 反応、並びに Eq. 1-3 に示す D-T 反応が挙げられる[10]。現在の核融合研究においては、最も反応を起こしやすい Eq. 1-3 に示す D-T 反応のエネルギー利用を主目標として研究開発が進められている。



核融合はその原理上、反応に際して二酸化炭素を始めとする温室効果ガスを生じない。加えて核子の結合エネルギーは化学結合エネルギーと比して極めて大きいために、核融合反応によるエネルギー変換は、単位利用可能エネルギーあたり必要な物質量が化石燃料と比して極めて少量である。さらに、核融合反応に必要とされるD（重水素）は海水中に豊富に含まれ、T（三重水素）についても同じく海水中に豊富に存在するリチウムから生成可能である。このことから、Bradshawら(2011)の試算[11]によれば、地球上に存在する燃料資源のみで核融合反応は人類の全エネルギーを1,400万年間供給可能であるとされる。

以上から核融合反応を通じたエネルギー変換は、低エントロピー物質の消費、並びに二酸化炭素の大気中への放出の双方を抑え、21世紀の人類に求められる地球上のエントロピー増大速度の減速に繋がる革新的エネルギー技術である。即ち核融合の実用化はエネルギー資源埋蔵量問題、地球温暖化問題の双方の根本的緩和を可能とし、人類の生存に大きく資するものである。

#### 1.1.4 核融合反応による発電の実現へと向けた研究

核融合は早くはOliphant, Harteck, Rutherfordらによる1934年の論文[12]において”Hydrogen Transmutation Effect”としてFigure 1-2に示す通り報告が為されており、その理論的枠組みは第2次大戦前には既に構築されていたとされている。核融合反応をエネルギー源として活用する取り組みは1950年代より活性化し、以降核融合により発電を行うことを目標に、各国における本格的な核融合研究が始まった[13]。

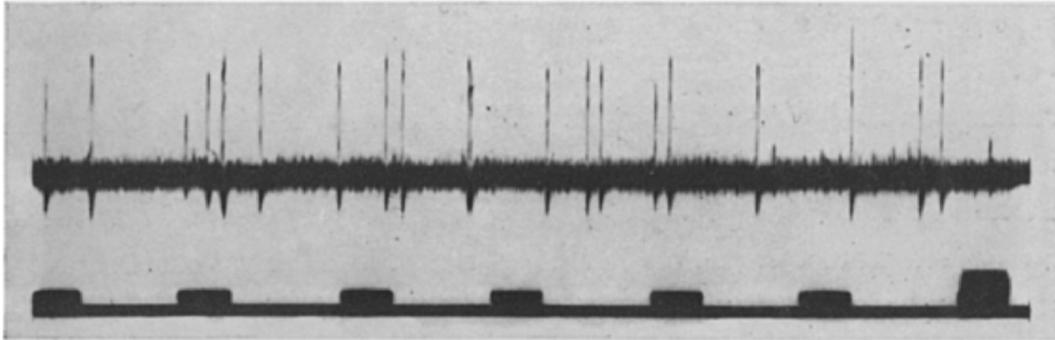


FIG. 6.— ${}^3_1\text{H}$  particles from  $\text{D} + \text{D}$  (1.1 cm absorber).

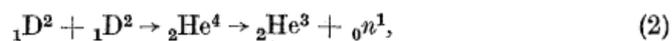


Figure 1-2 “Hydrogen Transmutation Effect” Observed by M. L. E. Oliphant, P. Harteck and Lord Rutherford (1934) [12].

D-T 反応により直接的に放出されるエネルギーは、核融合により生じたヘリウム原子核並びに中性子の持つ運動エネルギーである。従って核融合反応を用いた発電所の実現にあたっては、核融合反応を容器内に閉じ込め、反応を制御下に発生させ、かつ発生した粒子の運動エネルギーを熱に変換し、その熱を電気エネルギーに変換する過程を経る必要がある<sup>1</sup>。

現在世界各国において、核融合反応を容器内に閉じ込め、反応を制御下に発生させる段階の要素技術について、大規模な実験装置を用いた研究開発が実施されている。さらに、現在フランスにおいて建設中である国際熱核融合実験炉 (ITER) においては、発生した粒子の運動エネルギーを熱に変換する段階についての実証実験が実施される計画である。

### 1.1.5 核融合発電所の実用化へ向けた課題

国際熱核融合実験炉 (ITER) における実証実験後を見据え、現在各国において核融合による発電の実用化に向けた開発計画が策定されており、一例として我が国においては 2040 年頃に原型炉 (DEMO 炉) を建設し、安定的な発電を実現する計画が掲げられている [14]。この目的のため、現在世界中で炉工学、材料工学、プラズマ物理学等の多方面から精力的な研究開発が実施されている。現在認識されている核融合発電所の実現に向けた主要な研究課題を以下に示す。

<sup>1</sup> ただし MHD 発電方式においては粒子の運動エネルギーから電磁誘導により直接電流を発生させるために、熱エネルギーへの変換を必要としない。

第一の課題は、核融合炉におけるプラズマ閉じ込め性能のさらなる向上の必要性である。Eq. 1-3 に示される D-T 反応を引き起こすには D 並びに T を高温のプラズマとし、これらを数億度という超高温に加熱の上、閉じ込める必要がある。安定的な発電に必要な閉じ込め性能の達成のためにはプラズマ加熱工学のさらなる発展並びに超電導コイルの性能向上が必要であるだけでなく、安定的な反応の継続のためのプラズマ制御工学や真空・粒子制御等の総合的な知見が求められ、引き続き多方面からの総合的な研究が求められている[15, 16]。

第二の課題は、核融合炉建設に必要な材料の開発である。特にプラズマに直接対向する第一壁並びにダイバータは核融合反応による熱並びに粒子線による強い負荷を受けるために、これらの負荷に耐え、かつ高い熱伝導率と小さな線膨張係数を具備する材料の開発が不可欠となる。さらに、核融合炉において燃料増殖、熱エネルギー生成、中性子遮蔽の役割を併せ持つブランケットにおいても、必要とされる性能を満たす増殖材・構造材料の開発が今後さらに必要である。多くの材料は未だ目標性能を満たす途上であり、核融合発電所の実用化に向け、精力的な研究が続けられている[17]。

第三の課題は、核融合発電所の運用にかかる放射性物質の取り扱いである。核融合発電所は高レベル放射性廃棄物を産出しない。しかしながら一方で、格融合発電所においても三重水素や放射化ダストといった放射性物質は存在し、これらを真空容器と建屋により閉じ込めるための検討が今後さらに必要である。さらに、核融合炉の定期交換により生じる多量の低レベル放射性廃棄物の管理方法についても、今後詳細に検討されねばならない[18]。

最後にこれらに加え、今後核融合を発電所として実用化するにあたり重要であるにも関わらず、従来顧みられて来なかった第四の主要な課題が存在する。それは、核融合発電所の導入先社会における受容性に関する課題である。民主国家において新技術が成功裏に実用化されるためには、要素技術の成熟はもとより、社会における受容性が満たされることが必要不可欠である。受容とは「受け入れて取りこむこと[19]」を意味する単語であり、特に近年は「企業・施設・新技術などが地域社会や国民の理解・賛同を得て受け入れられること [20]」を意味する社会的受容性 (Public Acceptance) がエネルギー源に対して以前にも増して厳しく問われている。特に核融合発電は電力という社会の基盤インフラに関わる新技術であり、その社会的責任は重い。従って、核融合発電所の実用化へ向けた研究にかかる諸々の要求事

項は核融合発電所が導入される社会に由来するものであり、特に電力系統に安定して電力を供給できるという社会への保証こそが、核融合発電所の実用化における最低限の必要条件であるということを銘記せねばならない。

### 1.2 本論文の目的

1.1.4 節において概述の通り、現在の核融合研究においては核融合プラズマを閉じ込め、反応を制御下に発生させ、かつ発生した粒子の運動エネルギーを熱に変換するまでの過程において、精力的な取り組みが世界中で為されている。その一方で、その熱を電気エネルギーに変換する過程、さらにはその電気エネルギーが供給される先の電力系統への影響といった段階については、未だ研究がほとんど成されていないのが現状である。しかしながら、核融合発電というリードタイムの長いエネルギー技術の研究にあたっては、常に将来の社会の有り様を予測し、その受容性を左右するポイントを見極めた上で、それを見通した研究開発を実施せねば、社会への成功裏の導入は成らない。

Davis ら(1989)[21]は Technology Acceptance Model として、新技術の受容性には Perceived usefulness と Perceived ease-of-use の2点が重要であると分析している。核融合発電所においても、核融合の持つと考えられる優れた特性(Perceived usefulness)のみで社会導入が可能であると考えるのは誤りであり、その導入が社会に対しストレスを生じない見通しを示す(Perceived ease-of-use)ことが併せて必要となると考えられる。このことは換言すれば、核融合発電所の社会的受容性の最も基礎的な部分に、核融合発電所の導入が電力系統に擾乱をもたらさないという保証、即ち電力系統への受容性が存在することを意味する。

以上から、本論文の目的を以下の通り設定する。本論文の小目的は、核融合発電所が導入される将来の電力系統の有り様を予測し、核融合という新たなエネルギー源を将来電力系統に成功裏に導入するために必要となる条件を定量的に分析することである。そして本論文の大目的は、この分析をもって、核融合開発戦略に新たな知見を加え、核融合の実用化、引いては人類の安定相への到達に資することである。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は、以下の通りである。

第1章では、核融合研究の背景並びに実用化に向けた研究課題について概観する。その上で、それを踏まえ、本論文の目的を述べている。

第2章では、世界における電力系統の現状を概観した上で、その将来像について見通しを示す。さらに、発電所の受容性を左右する重要な要素として電力系統安定性が存在することを記述し、中でも特に重要である周波数制御につき論じる。

第3章では、核融合発電所について、その構成、環境負荷、安全性等について概観する。併せて、世界各国において実施された核融合発電所（原型炉・実証炉）の概念設計に関するレビューを実施する。

第4章では、第3章で実施したレビューに基づき、将来の核融合発電所の想定として「水冷却定常トカマク炉・電気出力 1,200 MW」を設定し、この運転を模擬する核融合発電所シミュレーションモデルを構築する。さらに、本モデル上において核融合発電所に特異な事象であるプラズマディスラプションを模擬し、本事象発生時における発電所挙動について評価する。

第5章では、第4章で示唆されたプラズマディスラプション時の核融合発電所挙動が電力系統安定性に与える影響につき、電力系統過渡安定度評価モデルを新たに構築することで、定量的考察を実施する。

第6章では、第5章で指摘された核融合発電所のプラズマディスラプション発生時における電力系統への悪影響を緩和し、核融合発電所の電力系統への受容性を向上させる2手法について概念設計並びに有効性の研究を実施する。

第7章では、本論文において論じてきたプラズマディスラプション発生時の挙動並びに緩和装置の必要性が、将来の核融合導入戦略に如何なる影響を与えるかを経済的見地から研究する。

第8章は結論であり、本論文において得られた知見を総括し、今後の課題を述べる。

# 2 電力系統

## 2.1 人類と電力

### 2.1.1 エネルギー黎明期

人類が地球上の他の生命体とその存在を異にする所以は、エネルギーの人工的な利用と、それに立脚する高度な文明の保有にある。最初に火を人工的・管理的に利用することを習得した種はホモ・エレクトスであると考えられており、早くは100万年前の遺跡から明白な火の利用の痕跡が発見されている<sup>2</sup>[23]。以来人類は、熱並びに光エネルギーの取り出しを目的として有機物を燃やし、運動エネルギーの利用を目的として風車と水車を発明することで、その生活の質を向上させ、文明を発展させてきた。

### 2.1.2 電力と生活の質

人類文明におけるエネルギー利用に大きな転機をもたらしたのは18世紀の熱機関の発明と、それに続く19世紀後半の電気工学の急速な発展であった。熱機関の発明は1次エネルギー源の放出する熱エネルギーを運動エネルギーへと変換し取り出すことを可能にした。続く電力工学の発展は、熱機関により生み出した運動エネルギーを「電気」という無形の媒質に変換することで遠隔地まで、瞬時に、かつ幅広い用途のために分配することを可能にした。

本論文執筆現在、人類は毎年およそ  $5.1 \times 10^{15}$  g (= 5.1 Gt) の石油に相当するエネルギーを以て発電を行っており、この数値は2040年までに  $8.1 \times 10^{15}$  g に至ると予測されている[6]。この数値はその後増大すると考えられているが、それは21世紀に至ってなお、電力使用量と生活の質との間に強い正の相関関係が存在するためである。

Figure 2-1 は横軸に各国の一人あたり平均電力消費量の対数を、縦軸にその国の平均寿命を示した図である。

---

<sup>2</sup> 現生人類たるホモ・サピエンスによる最初の火の幅広い利用は125,000年前頃と考えられている。22. Burenhult, G., *The first humans: human origins and history to 10,000 BC*. Vol. 1. 1993: Harper San Francisco.

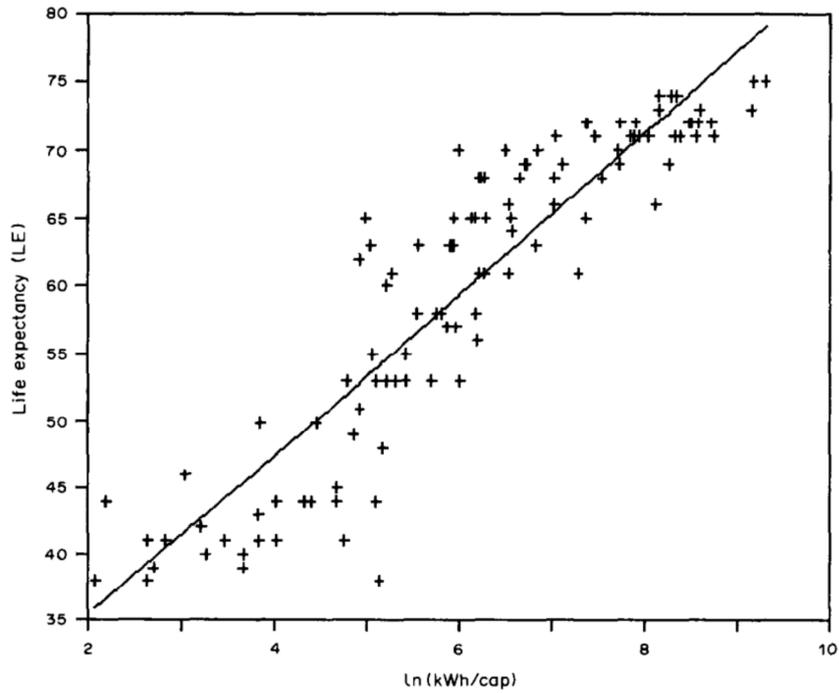


Figure 2-1 Average Life Expectancy vs. Electricity Use per Capita [24].

Figure 2-1 は各国における電力使用量の対数と平均寿命との間に、強い正の相関関係が存在することを明白に示している。この分析をさらに包括的なものにするため、Figure 2-1 を拡張し、縦軸に国連人間開発指数(HDI)を取ったグラフを Figure 2-2 に示す。

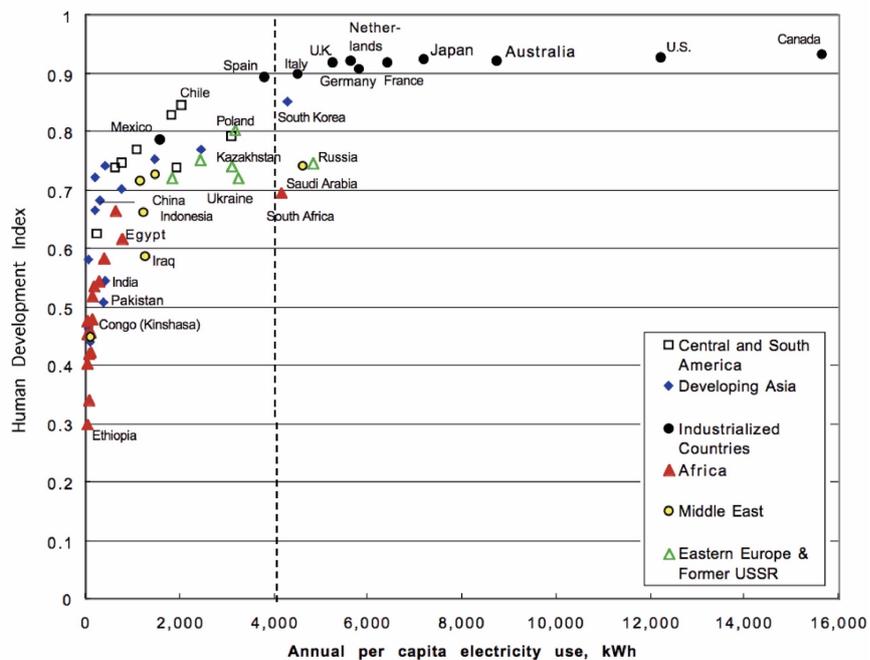


Figure 2-2 UN Human Development Index vs. Electricity Use per Capita [25].

国連人間開発指数(HDI)とは各国の平均余命に加え、教育並びに経済に関する指数を複合することで、各国における人間開発の段階を0から1の範囲で表したものである。Figure 2-2は、保健、教育および所得の3つの側面での人間開発について、特にある一定のライン（おおよそ HDI = 0.9）に至るまでの開発については、電力使用量が密接に関わっていることを示している。

平均寿命、国連人間開発指数のいずれも、それ単体で生活の質を十分に表していると言えるものではない。しかしながら、これらの分析は今後の発展のためさらなる電力を必要としている国家が地球上に未だ多数存在するという厳然たる事実を示しており、発展途上国における人口の増加傾向を併せて鑑みれば、電気という2次エネルギーへの新規需要は当面において途絶えることは無いと考えられる。

## 2.2 電力市場の現状並びに将来像

### 2.2.1 電力市場の現状

一般に先進国と呼ばれる国々においては、2017年時点でほぼ100%の世帯に電気が行き届いている。一方、発展途上国においては電力供給が未発達で、電気へのアクセスのない人口・地域が未だ多数存在するのが現状である。IEAによる2013年時点における電化率並びに未電化人口の推計値[26]をTable 2-1に示す。

Table 2-1 Electricity Access in 2013 - Regional Aggregates [26].

Region	Population without electricity [million]	Electrification rate [%]	Urban electrification rate [%]	Rural electrification rate [%]
<b>Developing countries</b>	<b>1,200</b>	<b>78%</b>	<b>92%</b>	<b>67%</b>
Africa	635	43%	68%	26%
<i>Sub-Saharan Africa</i>	<i>634</i>	<i>32%</i>	<i>59%</i>	<i>17%</i>
Developing Asia	526	86%	96%	78%
<i>China</i>	<i>1</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>
<i>India</i>	<i>237</i>	<i>81%</i>	<i>96%</i>	<i>74%</i>
Latin America	22	95%	98%	85%
Middle East	17	92%	98%	79%
<b>Transition economies &amp; OECD</b>	<b>1</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>WORLD</b>	<b>1,201</b>	<b>83%</b>	<b>95%</b>	<b>70%</b>

Table 2-1 は、先進国を全て合計しても未電化人口は 100 万人程度である一方で、サハラ以南アフリカだけで未電化人口が 6 億 3400 万人存在するなど、地域ごとに電化率に非常に大きな開きが存在することを示している。

### 2.2.2 電力市場の将来像

#### 2.2.2.1 先進国における将来像

この状況の下、世界では電力市場に関し、先進国と発展途上国において異なった動機のもと異なった方向性の動きが同時に進行しつつある。

先進国では、既に一人当たりの電力需要にあまり伸びは見られなくなっている [27]。それどころか、エネルギー原単位は産業の高付加価値化、効率の改善でむしろ今後減少の傾向が予測されており、電力についても単純に電力価格でなく、環境負荷などの付加価値において消費者が選好する市場が生まれつつある [28]。それにあたり先進国においては、従来は安定したエネルギー供給のため原子力・火力・水力・天然ガスのミックスを追求する国が多かった一方で、近年急速に原子力発電の廃止国・モラトリアム国が急増しており、代わって再生可能エネルギーの導入が急速に伸びている。さらにコジェネレーションや中小規模ガスタービン、蓄電による分散電源システムの増加と送電の双方向化が進む一方、需要側では DC 化・インバータ化により変動感受性の低下が懸念されている。

また、先進国の多くにおいて電力市場が自由化されたことにより、売電単価は単純な総括原価方式から、複雑なマーケットメカニズムに基づく市場価格によって決定されるように姿を変えた。電力市場の自由化とは発電・送配電・小売事業の分離を通して電力事業への参入を自由化することを指し、1990 年代に欧州において始まった潮流である。特に送電事業を分離することをアンバンドリングと呼び、Figure 2-3 に示す TSO (Transmission System Operator) 方式と ISO (Independent System Operator) 方式が一般的である。欧州では TSO 方式を、米国は ISO 方式を採用している。米国では特に広域 ISO について RTO (Regional Transmission Operator) と呼び、PJM・MISO・SPP・ISO-NE が認可されている [29]。こうした市場メカニズム導入の目的は、市場原理に基づく合理化の促進にある。

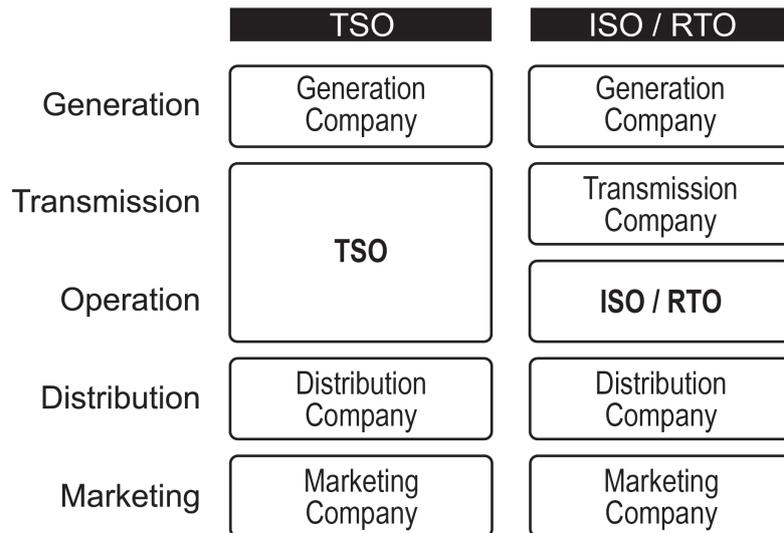
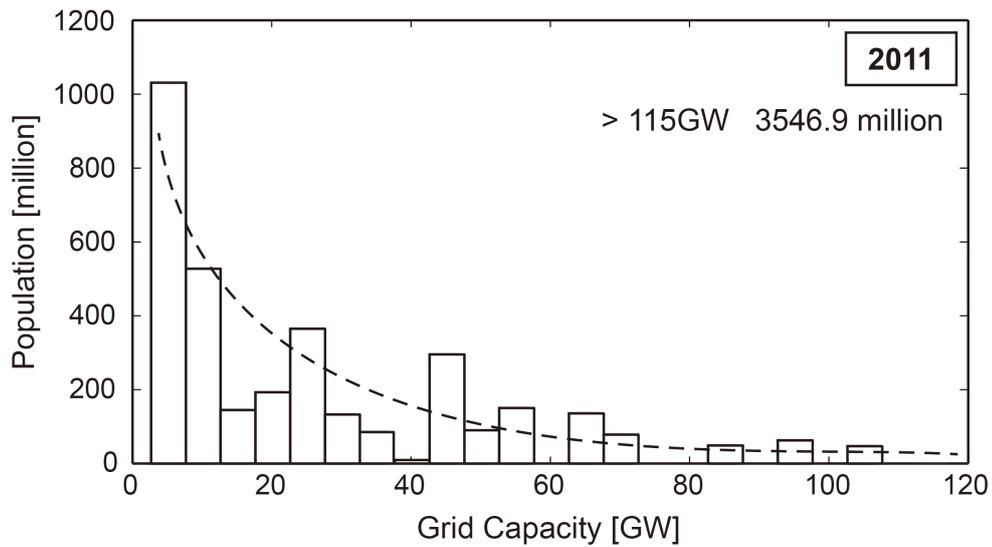


Figure 2-3 Illustration of TSO / ISO Unbundling (modified by the author from [28]).

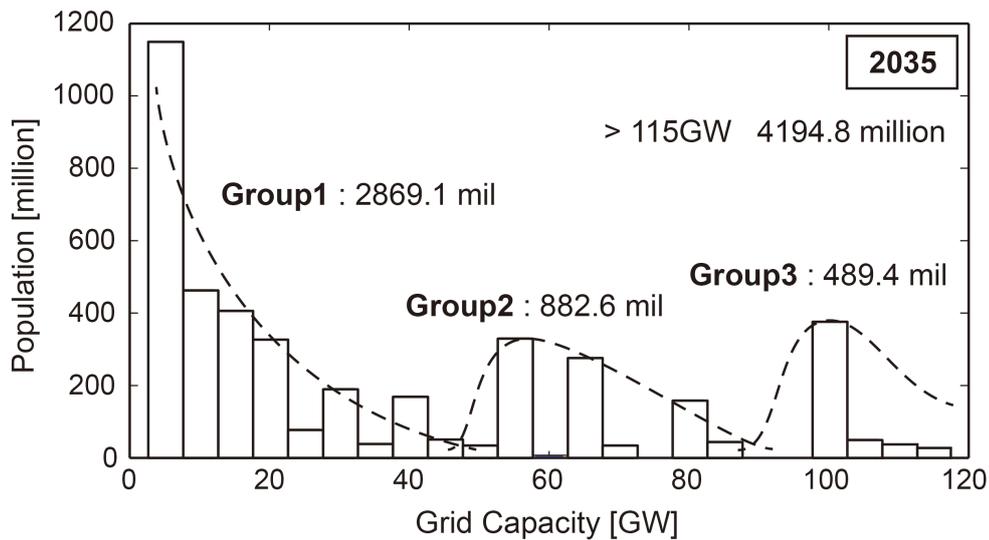
### 2.2.2.2 発展途上国における将来像

2.1.2 節において示された分析の通り、発展途上国における開発は未だ電力供給と強い相関があり、多くの発展途上国においては一定以上のエネルギー需要を満たすまで電力市場の拡張が急速に続くことが予測されている。加えて発展途上国においてはしばしば国営・公営企業が独占的・寡占的に電力システム開発を実施している。この理由から発展途上国においては、都市化・工業化に伴い行政主導で大規模かつ短期間に発電所の建設を集中的に実行する事例が散見され、今後の原子力発電所建設需要の大部分は発展途上国において生じると予測されている[30]。

一方で、全ての発展途上国が同様のスピードで電力市場を発展させることが出来る訳ではないことにも留意せねばならない。Figure 2-4 は電力系統の容量が 120 GW 以下の国・地域に住む人々について、人口を縦軸に、アクセス可能な電力系統のサイズを横軸にとり筆者により描かれたヒストグラムである。Figure 2-4 (a)は、2011年においてこれらの国と地域に住む人々が、ほぼ一様に極めて小さい電力市場へのアクセスしか持たない現状を表している。しかしながら Figure 2-4 (b)はこれらの国・地域が、発展速度の差により、2035 年までに未だ電気へのアクセスがほとんどないグループ(Group 1)、中規模の電力系統を発展させるグループ(Group 2)、比較的大規模な電力系統を備えるようになるグループ(Group 3)に分かれることを示唆している。このうち、Group 2 として分類される 45–90 GW の電力市場への適用性こそが、今後の新規電源の導入における鍵となる新興市場と分析される。



(a) In 2011



(b) In 2035

Figure 2-4 Histogram of Population against Accessible Electrical Grid Capacity (Illustrated by the author [31], data based on [32, 33]).

### 2.2.2.3 先進国／発展途上国において共通した電力市場の方向性

2.2.2.1 節並びに 2.2.2.2 節において概述の通り、先進国と発展途上国では電力システム開発へ向けた動機の多くが根本的に異なるものの、一方において、その双方で同時に進行している潮流も存在する。それが、気候変動問題の解決に向けた発電源の低炭素化の動きである。

UNEP(国連環境計画)とWMO(世界気象機関)が1988年に設立した気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、5次に渡る報告書の公表を経て、“人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因であった可能性が極めて高い”[7]と2013年に結論づけた。こうした国際社会における公論の高まりに後押しされ、2015年には全地球的な温室効果ガス削減協定であるパリ協定が成立した。パリ協定は、先進国・途上国の別を問わず各国に温室効果ガス削減の約束草案の提出を義務付けており、これを達成するための取り組みが各国において現在活発に実施されている。

現在温室効果ガスの削減において重要な役割を果たすと期待されているのが再生可能エネルギー並びに原子力発電である。先進国においては、発電における環境負荷の軽減を重視する世論を背景に、FIT(Feed-In-Tariff)制度などを積極的に活用し、国民の経済的な負担のもとで急速に再生可能エネルギーの導入が進んでいる。発展途上国においては、先進国の経済援助等を活用することで、再生可能エネルギー並びに原子力発電の急速な導入が見込まれている。Figure 2-5 に世界の再生可能エネルギー並びに原子力発電のシェアについて、2012年実績値と2040年予測を比較する。Figure 2-5からは、日本を例外としたOECD諸国においては原子力の導入は進まない一方で再生可能エネルギーの大幅な導入が見込まれる一方、非OECD諸国においては原子力・再生可能エネルギーの双方の導入が進むことが読み取れる。

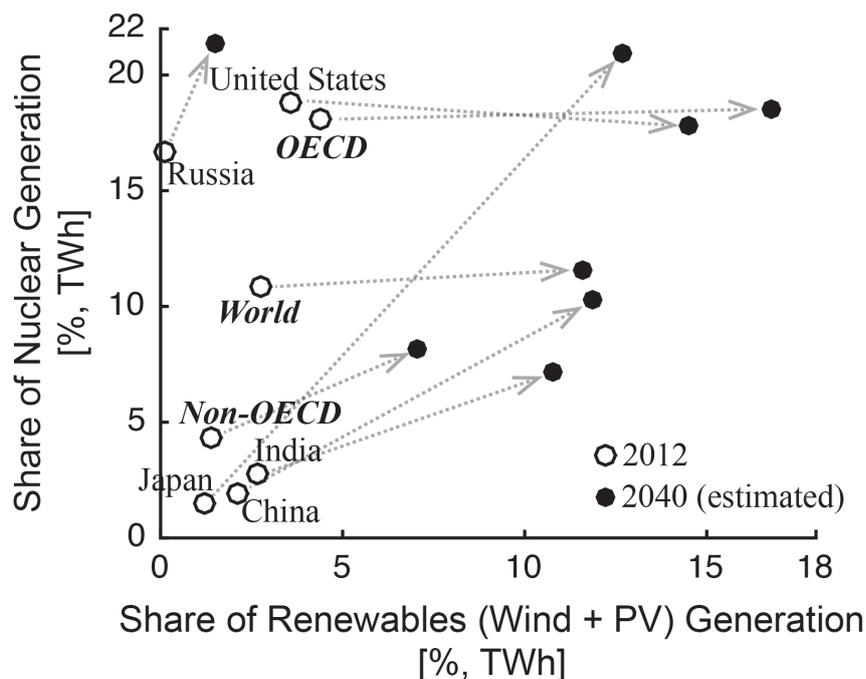


Figure 2-5 Comparison of Renewable and Nuclear Generation Shares in 2012 and 2040 (Illustrated by the author [34], data based on [35]).

## 2.3 電力系統とその安定性

### 2.3.1 電力系統の特性

電力はその利用に際し、それを生み出し社会に行き渡らせる基盤インフラである電力系統を必要としてきた<sup>3</sup>。

電力系統とは、発電—送電—配電で構成される一連のシステムをいう。人類史における初めての電力系統は1882年、Thomas Edisonがニューヨーク市パールストリートに6台の火力発電所を設置し、100,000フィートの配電線を以てウォール街半径1 kmに存在する1,000を超える白熱灯を灯した際に構築されたと考えられている[36]。以来電力系統は世界各国において着実に広まりを見せ、初めは1つの需要地に1つの発電所が建設されていたものが、やがて単一の電力系統のもとに多数の発電所並びに需要家が接続される有機的システムへと発展した。

石亀は、「電力システム工学」(2013)[37]において、電力系統の特徴として以下の7つを挙げている。

“第一は、生産と消費が同時に行われることである。…発電した電力は、送電線・配電線を介して瞬時に需要家に送られ、消費される。…現在の電力システムでは、…大容量の電力を貯蔵する設備は揚水発電しかなく、…負荷に見合う電力を常に発電し、時々刻々と変わる負荷に対応してバランスをとるよう制御しなければならない。

…第二に、1つの電力システムに接続された発電機は、同一の周波数で同期して運転される。系統に事故が起こったり発電機が離脱したりすると、…周波数の変化など、その影響は系統全体に及ぶ。…最悪の事態では系統全体の停止（停電）に至る。

…第三に、電力システムに流れ込んだ電力を物理的に区別することはできず電力としては均質なものとなり、消費される電気がどの発電機に由来するかはわからない。

…第四に、電力システムの配送電設備の大半は、常に自然環境にさらされていることである。…風雨や鳥獣による被害を完全になくすことは不可能である。

---

<sup>3</sup> 近年、家庭用再生可能エネルギーなどの分散エネルギー源の登場にともない、電力系統を介さないオフグリッドの電源も多く登場しているものの、未だに規模としては小さい。

…第五に、安定な運転に必要とされる余裕は、運転状態とともに常に変化する。その変化に応じて、…安定度や信頼度を損なわないようある程度の余裕が必要である。

…第六に、電力システムを構成する設備の建設には長期間かかるとともに、一度作られた施設は数十年と使われる点である。…発電・送電設備の建設には莫大な資金が必要であり、投資した資金は長期間かけて回収することを想定している。

…第七に、…電力システムは常に、既存のシステムに新しいシステムを上乗せしてきたシステムである。…既存の古いシステムと新しいシステムが衝突することなく、整合を取りつつ高度なシステムへと発展していかなければならない”

以上の文章において端的にまとめられた、他の市場と異なる多くの特異性を具備したシステムが、電力系統である。

## 2.3.2 電力系統の安定性

### 2.3.2.1 電力系統周波数

需要家から見て、電力系統において最も重要なことは、品質の良い電力が安定的に供給されることであると言って良い。この評価基準において、最も重要となるのが電力系統の周波数である。

電力系統においては発電と消費が常に同時同量でなければならないことは2.3.1節において述べられたとおりであるが、この2つの間に差異が生じた場合、系統に同期している発電機には負荷がかかり、結果的に Eq. 2-1 において単純化して表されるように回転速度が増加または減少する。ここで  $M$  [sec]は慣性定数、 $\omega$  [rad/s]は角速度を表し、 $P_e$  [W]および  $P_m$  [W]はそれぞれ電気的入力パワー、機械的出力パワーである。

$$P_e - P_m = M \frac{d}{dt} \omega \quad (\text{Eq. 2-1})$$

これにより、発電所での電気出力パワーが機械的入力パワーより大きい場合には電力系統周波数は上昇し、逆の場合には下降する。

## 2.3.2.2 周波数管理目標

電力系統の負荷は常に変化するために、発電所での機械出力と負荷は常に一致する訳ではなく、従って電力系統周波数にも常に変動が生じている。しかしながら、電力系統の周波数変化は接続された機器に様々な悪影響を与えるために、電力系統周波数を一定に保つことは、電力の品質を管理する意味において極めて重要である。一例として、東京電力は、0.5%程度の周波数逸脱で、需要家からの”お問い合わせ”が寄せられると報告している<sup>4</sup>[39]。

このため、各電力会社は電力系統周波数の基準値からの逸脱について、厳しい基準を設けて制御している。Table 2-2 に、我が国および米国における主な電力系統の周波数制御目標値を示す。ここで米国の目標値が我が国の目標値と比して大きく小さいのは、我が国と米国の電力系統の容量の違いによるものである。即ち電力系統の容量が小さい程、周波数の制御が難しくなることを反映しているものであると言える。

Table 2-2 Frequency Control Targets on Various Systems (Japan and North America) [40].

Power System	Value	
Japan	Hokkaido	$\pm 0.3$ Hz
	East System	$\pm 0.2$ Hz
	Middle-West System	$\pm 0.2$ Hz
North America <sup>5</sup> (NERC)	East System	$\pm 0.018$ Hz
	West System	$\pm 0.0228$ Hz
	Texas (ERCOT)	$\pm 0.020$ Hz

<sup>4</sup> 通産省(2000)による調査では、電力系統周波数の変化に対し特に影響を受けやすい業界として、化学繊維製造業：巻き取り速度の変化により、糸切れの発生や糸の太さ等の品質に影響、石油業界：分解・脱硫する圧力制御に影響が生じ、不純物が除去されない、自動車業界：車体パネルの通電時間が変化し、溶接強度や外観品質に影響、などを挙げている。38. 新エネ部会電力系統影響評価検討小委中間報告書、2000, MITI: Tokyo.

<sup>5</sup> 我が国と米国において系統周波数の管理目標値が大きく異なるのは、電力系統そのものの規模が大きく異なるためである。大きな電力系統においては、系統に接続されている発電機の慣性定数が大きくなり、さらに需要の平準化効果も見込まれるために、一般に周波数変動が小さくなる。従って、規模が小さい電力系統ほど、周波数の変動は大きく、管理はより困難になる。

## 2.3.2.3 負荷・周波数制御

電力系統の負荷が示す典型的な振る舞いについて、横軸に時間を、縦軸に負荷をとって模式図を示したものが Figure 2-6 である。

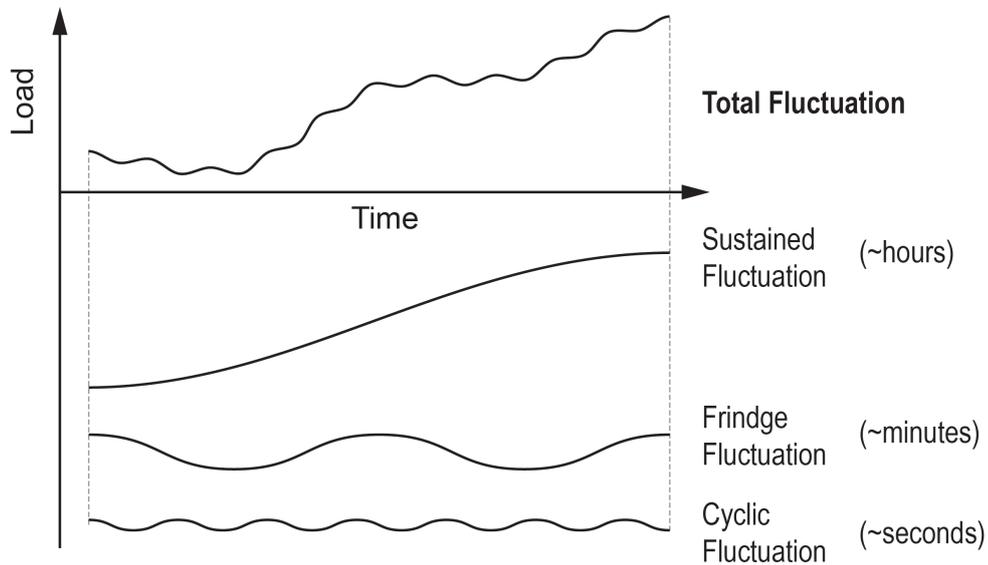


Figure 2-6 Illustration of Typical Power System Load Behaviors [41].

Figure 2-6 は電力系統負荷の変動について、通常、その変動周期の時定数に基づいてサステンド成分・フリンジ成分・サイクリック成分の3つに分解して捉えることを示している。電力系統ではこれら周期の異なる負荷について、それぞれ異なるアプローチで発電所出力を変化させることにより、電力系統周波数を一定に保つべく制御が為されている。

サステンド成分は数時間単位の変動周期を持つ負荷変動であり、変動の主因は人々の生活様式や天候である。サステンド成分は変動の幅が大きいため、変動が起きてから発電出力の調整を行っても対応出来ないことが多く、予め前日までに負荷変動の予測を行った上で、それに従って発電所の運用計画を立案することで対応する。これを ELD (Economic Load Dispatch) と呼ぶ。

フリンジ成分は数分～数十分の周期を持つ負荷変動である。この負荷変動に対しては、一般に自動化されたシステムを用い、電力系統に接続されている各発電源に対して中央給電指令所から出力増加・減少の指令を出すことによって対応する。これを LFC (Load Frequency Control) と呼ぶ。

サイクリック成分は数秒～数分の周期を持つ負荷変動である。この負荷変動のうち、特に周期の非常に短い成分(< 30 sec 程度)は、電力系統の持つ負荷—周波数特性<sup>6</sup>によって吸収される。それより長い成分については、各発電源が、電力系統周波数に応じて自律的に出力を変動させることで対応される。これをガバナフリー(GF)運転と呼ぶ。

これらの対応について、横軸に負荷変動の時定数を、縦軸に変動の大きさを示すことで概念図として示したものが Figure 2-7 である。

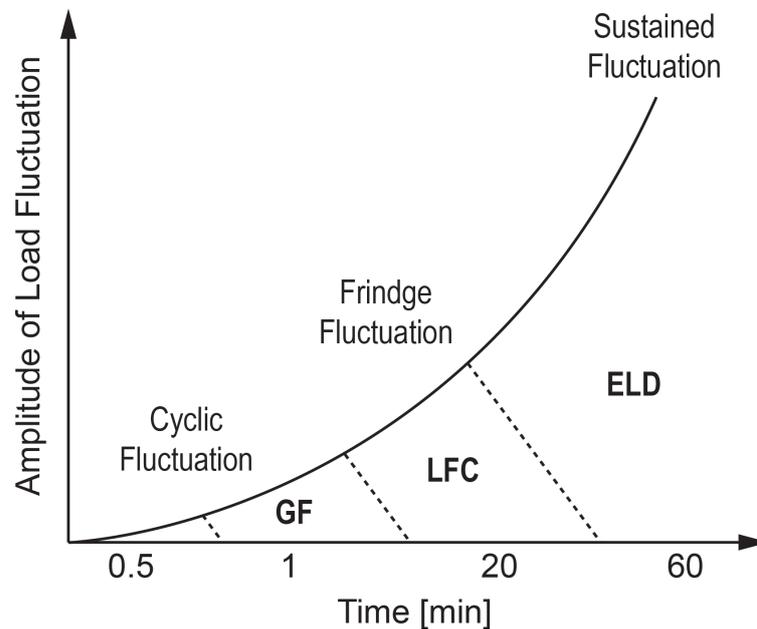


Figure 2-7 Illustration of Frequency Control Measures [43].

#### 2.3.2.4 周波数逸脱による事故

周波数変動が 0.5%程度を超過すると接続された機器に影響が出ることは 2.3.2.2 節において述べた。この逸脱がさらに数%程度まで拡大した場合、電力系統に接続された同期発電機の脱落が起こり、これによりさらに周波数が逸脱することで、カ

<sup>6</sup> 交流システムの特性によって、周波数が上昇すると電力系統における消費電力も上昇するフィードバック特性のこと。ただし、近年、家庭用電化製品にインバータが用いられた製品の普及が進んでおり、負荷—周波数特性については今後縮小する可能性が指摘されている。42. Tabata, Y., *Investigation into Load Characteristics of Stand-alone Equipment (Household Electric Appliances)*. 中部電力技術開発ニュース, 2000. 11(87): p. 11-12.

スケード的（雪崩的）停電に繋がる場合がある。これは、同期発電機は運転可能な系統周波数の許容範囲が決まっており、一般にそれは±3%程度（即ち 50 Hz 系統においては±1.5 Hz 程度）であることによる。Figure 2-8 はマレーシアにおける 1996 年の停電事故時の電力系統周波数の挙動を示したものであり、横軸に時間を、縦軸に系統周波数を取り、矢印で各電源の脱落を表している。

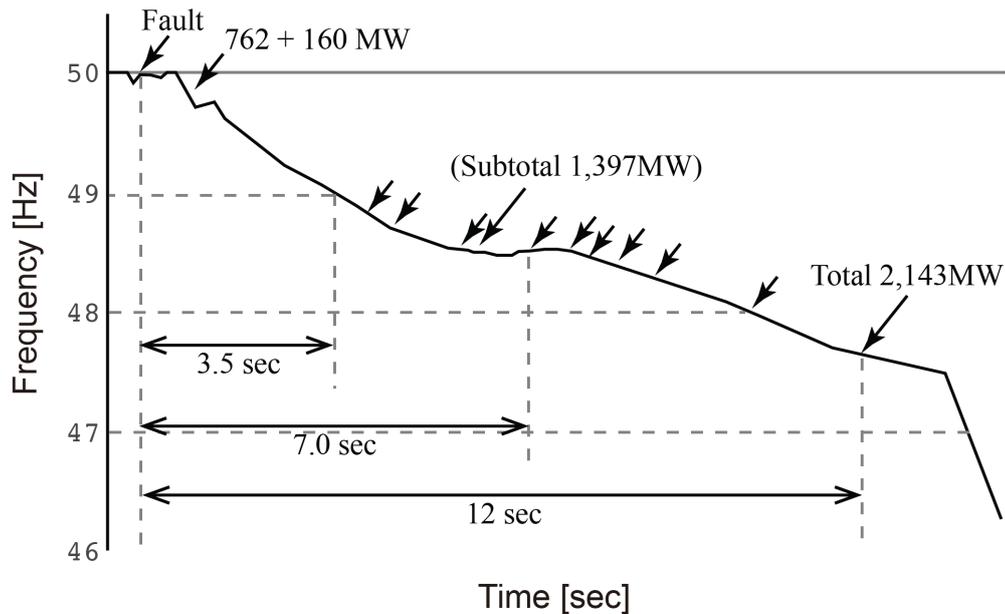


Figure 2-8 Utility Frequency Behavior of the Cascading Power System Failure in Malaysia, 1996 [40].

Figure 2-8 からは、変電所事故によって2つの電源が失われたことにより電力系統周波数が 3.5 sec で約 1 Hz 低下し、その直後に雪崩のように電源が脱落していることが見て取れる。7.0 sec 前後において周波数の低下が一時横ばいになっていることからガバナフリー運転による出力上昇が行われたことが推測されるものの、最終的に約 12 sec 後までに計 2,143 MW もの発電機が脱落し、大規模停電へと繋がっている。

このような事故は如何なる電力系統においても起こり得るだけでなく、昨今では、より許容周波数の厳しい風力発電等の導入増加によって、大規模停電へと発展する周波数逸脱の閾値がさらに低くなっているとも考えられている。以上の理由から、各電力会社では、電力系統周波数の管理について今後さらに厳しい態度で望むことが予測され、電力系統へ擾乱を発生させる可能性のある電源への電力系統への受容性は一層低下すると考えられる。

## 2.4 結言

核融合発電というリードタイムの長いエネルギー技術の研究にあたっては、常に将来の社会の有り様を予測し、その受容性を左右するポイントを見極めた上、それを見通した研究開発を実施せねば社会への成功裏の導入は成らない。特に核融合は人々の生活の質を支える社会の基盤インフラである電力系統への導入を企図した技術であり、その研究開発にあたっては電力系統に対する理解が不可欠となる。

そこで第2章では、世界における電力市場の現状を示すとともに、その将来の見通しの分析を行った。分析結果は、21世紀に至ってなお電力は生活の質の向上のために必要とされており、今後発展途上国において中小規模の電力市場が多く新興する予測を示した。また、発電所の受容性を左右する重要な要素として電力系統の安定性が存在することが併せて示された。特に1996年のマレーシアにおける停電事故に例示される通り、系統周波数の逸脱は大規模停電につながり得るため、電力系統周波数を一定の範囲内に維持することは今後も重要視されると考えられる。

これらの分析結果は、核融合発電所の将来社会への導入にあたり、電力系統の安定性がその受容性の焦点となる可能性を示唆するものである。電力系統周波数の逸脱は大規模停電にも繋がりうるために、核融合発電が社会的に対してもつ責任は重いものである。再生可能エネルギーの更なる導入により将来電力系統が今後さらに不安定化すると予測されること、さらに将来の新興電力系統の多くが中小規模であると分析されることを鑑みれば、核融合発電所はその電力系統安定性への影響を最小限に抑えねばならないと考えられる。

# 3 核融合発電所

## 3.1 核融合発電所の概要

### 3.1.1 核融合発電所の構成

1.1.4 節で概述の通り、核融合反応により生じるエネルギーはヘリウム原子核並びに中性子の持つ運動エネルギーにより放出される。従って核融合反応による発電を実現するためには、一般に粒子の持つ運動エネルギーを熱に変換し、その熱を以て発電サイクルを回す必要がある<sup>7</sup>。故に核融合発電所において必須となる構成要素は、核融合炉、核融合炉からの熱取り出し装置、並びに発電システムである。

#### 3.1.1.1 核融合炉

核融合炉は、核融合プラズマを閉じ込め、制御下に核融合反応を実施する装置である。核融合プラズマの閉じ込め方式には大別して慣性閉じ込め方式と磁気閉じ込め方式の2種類が存在する。

慣性閉じ込め方式は、プラズマを外部からの慣性力により瞬間的に高密度に圧縮加熱することで核融合反応を発生させる方式であり、特に慣性力にレーザーを用いるレーザー核融合の研究が進められている。

磁気閉じ込め方式は、電磁コイルにより発生させた磁場を用いてプラズマの閉じ込めを行う方式である。特に、磁力線の端からプラズマが逃げることを防ぐため磁力線をトーラス状（ドーナツ型）にする方式において研究が進んでおり、この方式の核融合炉はさらに電磁コイルの配置方式の違いによってトカマク型とヘリカル型に分類される。トカマク型は、トーラスに沿って配置したトロイダル磁場コイルにより発生されるトロイダル磁場と、プラズマ中に流れるプラズマ電流により生じるポロイダル磁場の合成により螺旋磁場を形成することによってプラズマを閉じ込める[44]。それに対しヘリカル型では、コイル自体を螺旋形に配置することで、閉じ込め磁場を形成している。

---

<sup>7</sup> プラズマの運動エネルギーを電磁誘導により直接電流に変換する MHD 発電という方式も存在するが、本論文においては扱わない。

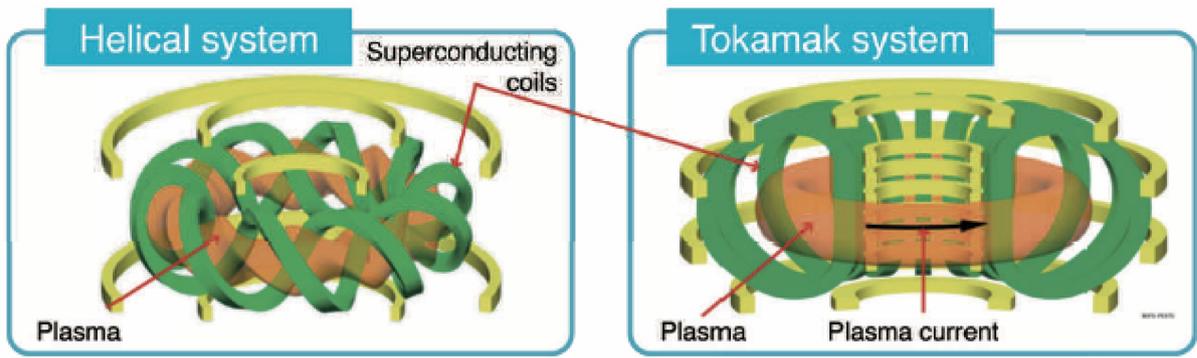


Figure 3-1 Comparison of Tokamak and Helical System [45].

現在、トカマク型炉による核融合エネルギー利用が科学技術的に成立することを実証するための核融合実験炉を建設する ITER 計画が日本・EU・ロシア・米国・韓国・中国・インドの7極国際協力により、フランスのサン・ポール・レ・デュランスにおいて進行中である。ITER はラテン語で道を意味し、我が国においては国際熱核融合実験炉<sup>8</sup>と呼称される。ITER の完成予想図を Figure 3-2 に示す。ITER の主な目標には 1) 500 MW の核融合出力を達成すること、2) 核融合発電所に必要となる統合運用技術を実証すること、3) 核融合発電所の安全性を実証することが含まれ [46]、ITER の建設並びに運用を通して核融合発電所の建設に必要な工学的知見の蓄積が為されることが期待されている。

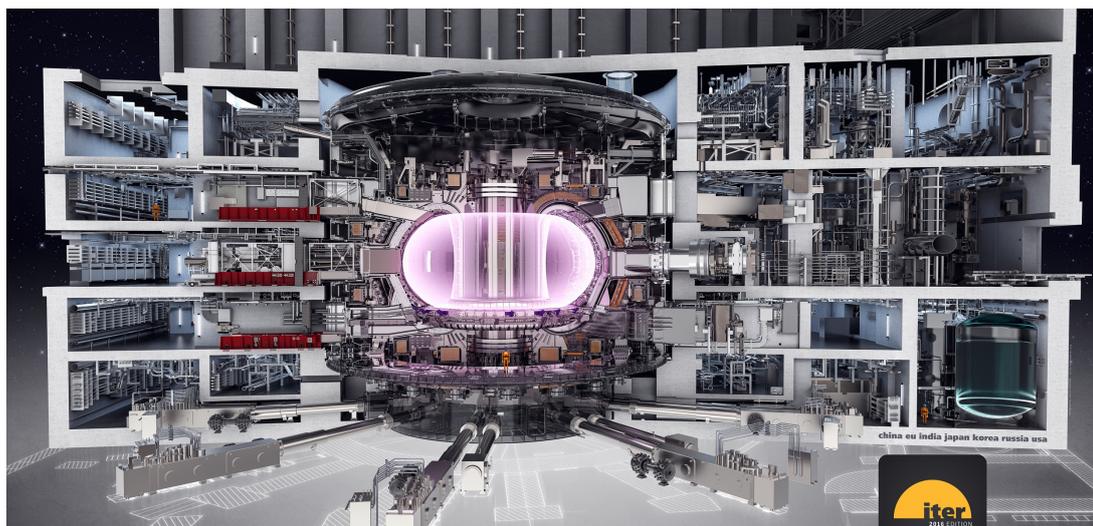


Figure 3-2 ITER Tokamak and Plant Systems [47].

<sup>8</sup> 過去には ITER は International Thermonuclear Experimental Reactor の略であるともされていたためである。

### 3.1.1.2 ブランケット

核融合炉に閉じ込められた核融合プラズマ中において発生した粒子の運動エネルギーは、核融合炉壁に敷設されたブランケットにおいて熱エネルギーに変換され発電システムへと取り出される。

ブランケットは核融合プラズマを覆う形で対向面に敷設され、プラズマから発生する中性子および輻射熱を吸収する厚さ1 m 前後の容器である。核融合プラズマにおける発生エネルギーの約80%は高速中性子の運動エネルギーとして放出されるが、この高速中性子はプラズマと相互作用をせずブランケットの内部まで侵入する。本高速中性子が内部の充填物を加熱すると共に、一部がブランケット内に配置されたトリチウムと Eq. 3-1 に代表される核反応を起こすことにより、ブランケット内にトリチウム並びに核発熱が生じる<sup>9</sup>[48]。



これらの2つの経路（中性子による加熱並びに核反応による加熱）によりブランケットにおいて発生した熱を冷却材が運び出すことにより、初めて核融合エネルギーは熱エネルギーとして利用可能な形となる[48]。

ブランケットは、その使用する構造材、充填する中性子増倍材・トリチウム増殖剤、冷却材などについて様々な設計が現在研究されている。ITERにはブランケットの試験を行うポートが計6つ設けられており、ここに各国の機関が試験用ブランケット装置（TBM、テストブランケットモジュール）を持ち込み、熱取り出し並びにトリチウム増殖の試験を実施する計画が進行している。

### 3.1.1.3 発電システム

ブランケット冷却材より取り出された熱は、中間熱交換器または蒸気発生器に伝達され、発電に利用される。核融合発電所において利用が可能であると考えられる発電システムにはガスタービン発電方式と水／蒸気タービン発電方式の2方式が存在する[49]。

<sup>9</sup> 即ちブランケットは、熱取り出し装置としての役割の他に、燃料となるトリチウムの生成、並びに中性子の遮蔽という重要な役割を併せ持つ。

ガスタービン発電方式は、ブランケット冷却材の熱を中間熱交換器を通してヘリウム・超臨界二酸化炭素などに伝達し、その膨張によりタービンを回し発電を行った後、気体を冷却・圧縮し中間熱交換器へと戻す方式である。本サイクルは一般にブレイトンサイクルと呼ばれる。

一方の水／蒸気タービン発電方式は、ブランケット冷却材により伝達された熱を用いて蒸気を発生させ、この蒸気によりタービンにおいて発電をした後、排気された蒸気を復水器において水に戻し蒸気発生器に給水する方式である。特に蒸気発生、発電タービン、復水器並びに給水ポンプから構成される最も単純なサイクルをランキンサイクルと呼ぶ。本ランキンサイクルと、その効率を改善させたサイクルである再熱サイクル・再生サイクル等は、現在における火力発電所並びに原子力発電所における発電方式の主流である。

#### 3.1.2 核融合発電所の運転方式

核融合発電所の運転方式としては、核融合プラズマの燃焼パターンによって大きく分けて定常運転とパルス運転の2方式が想定されている。

定常運転とは、核融合反応を常時維持することで、一定の出力で発電を継続する運転方法である。一方パルス運転とは、核融合反応を数時間継続させた後、反応を一時休止させることを繰り返す運転方法である。パルス運転としては、比較的短時間（数十分～2時間程度）のパルス運転をくり返し休止期間による核融合出力低下を蓄熱器で補うことで常時発電を行う方式と、電力需要の大きい昼の間だけ5～8時間程度パルス運転で発電を行う方式の2方式が検討されている[50]。

#### 3.1.3 核融合発電所の環境負荷

核融合はその反応に際して温室効果ガスや大気汚染物質等を放出しない。従って核融合発電所の環境負荷は主にその建設・運用・廃棄物処分に由来するものである。CO<sub>2</sub> 排出量に関しては小堀ら(2016)によるもの[51]、時松ら(2000)によるもの[52]など数多くの研究が存在する。それらの推計によると、核融合発電所におけるライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量は6から12 g/kWhであるとされており、これは現状の軽水炉における排出量(5.7 g/kWh)をわずかに上回るものの、風力発電(33.7 g/kWh)、石炭火力発電(270 g/kWh)を大きく下回る数値である[53]。

### 3.1.4 核融合発電所の安全性

核融合発電所は、軽水炉と異なり核的暴走を起こす危険性が原理的に存在しない。これは核融合プラズマにおいては粒子密度・圧力が限界を超えた場合、また不純物が混入した場合などにおいて、反応に必要な閉じ込め状態が維持できなくなるために反応が終息するためである[54]。さらに、核融合反応終了後に炉において発生する崩壊熱についても現行の軽水炉と比して熱密度が大幅に低く、非常用冷却系の必要性もないとされる[10]。しかしながら核融合発電所においても依然として、易動性の放射性物質がトリチウム並びに放射化ダストとして存在する。これらの放射性物質は軽水炉において生成される同様の易動性放射性物質と比較して影響は相対的小さいと考えられているものの[54]、閉じ込めと取り扱いに細心の注意が必要である点においては同様であり、留意せねばならない。

さらに将来の核融合発電所建設を見据えた場合、実験装置においては想定的重要性が大きい冷却材喪失事故（LOCA）などについても考慮の必要がある。このため近年はイベントツリー解析に基づく確率論的リスク分析（PRA）等、軽水炉において発展してきた安全性解析についての核融合発電所への適用がなされるようになってきている。

### 3.1.5 核融合発電所の核拡散抵抗性

核融合発電は一般に現行の軽水炉と比して核拡散に対する抵抗性が高いとされる。これは核融合発電所においては  $^{239}\text{Pu}$ ・ $^{233}\text{U}$ ・濃縮ウラン(HEU/LEU)といった核兵器材料[55]が扱われないためである。

しかしながら一方で Goldston ら(2009) [56]は、核融合発電所の冷却材中に天然ウランやトリウムを混合することで、核融合中性子を用いた核種反応によって年間数発の核兵器原料に相当する  $^{239}\text{Pu}$  または  $^{233}\text{U}$  を製造できると指摘している。また、Gsponer ら(2008) [57]は、核融合発電所中に豊富なトリチウムを流用することで、ブースト型核兵器並びに水素爆弾の製造リスクが存在すると指摘している。このことは、核不拡散・核セキュリティの両面につき、核融合発電所の持つ抵抗性を過信すべきではないことを示している。

## 3.2 核融合発電プラント設計レビュー

現在世界各国において、今世紀中庸における発電開始を目的として、実用炉の前段階たる原型炉段階の核融合発電プラントの概念設計が積極的に実施されている。本節では、その代表的な設計についてレビューを実施する。

### 3.2.1 Demo-CREST

#### 3.2.1.1 システム設計

Demo-CRESTは核融合発電の早期実証を目的として電力中央研究所において概念設計された早期発電実証炉であり、設計ガイドラインとして“（1）ITER で比較的早期に達成が見込まれるプラズマパラメータ、ITERにおいて達成される工学技術、ITERの建設・運転と並行して進められる工学技術開発、材料開発等をベースとしたできるだけ小さい技術的外挿で正味の発電が可能であること”“（2）ITER で目標とされる炉心プラズマパラメータの達成や補完プラズマ装置によるプラズマの高性能化、さらなる材料性能の向上や光学技術の進展によって、電気出力の増大が可能であり、実用規模の電気出力の達成が可能であること”“（3）できるだけ小型化を図り、建設・運転の費用を合理的な範囲とすること”の3点が設定されている[58]。本ガイドラインに従い、Demo-CREST は ITER における高 Q 運転が開始された段階で建設が可能となるようシステム設計がなされている[59, 60]。Demo-CREST は定常運転を目的として設計されており、システム設計は規格化 $\beta$ 値 3.4 において核融合出力 3,000MW、発電端電気出力 960MW となっている[59]。

#### 3.2.1.2 炉設計

Demo-CREST は ITER 計画の標準運転で正味電気出力を得ることが出来る条件から、大半径 7.25m、アスペクト比 3.4 とし、十分に実現の見通しのある 16T の超伝導コイル並びに熱効率 30%を設計点としたトカマク型核融合炉である[61]。規格化 $\beta$ 値 3.4 における Q 値は 20、平均中性子壁負荷  $2.7\text{W}/\text{m}^2$ [59]である。

Demo-CREST の概念設計において特徴的であるのは負磁気シア放電によりプラズマ閉じ込め性能の向上が図られている点であり、この負磁気シアプラズマ運転による良好な閉じ込め性能は、プラズマディスラプションの頻度の低下とともに、将来

の実用炉における部分負荷運転に繋がるものであるとされる[61]。Demo-CRESTの断面鳥瞰図を Figure 3-3 に示す。

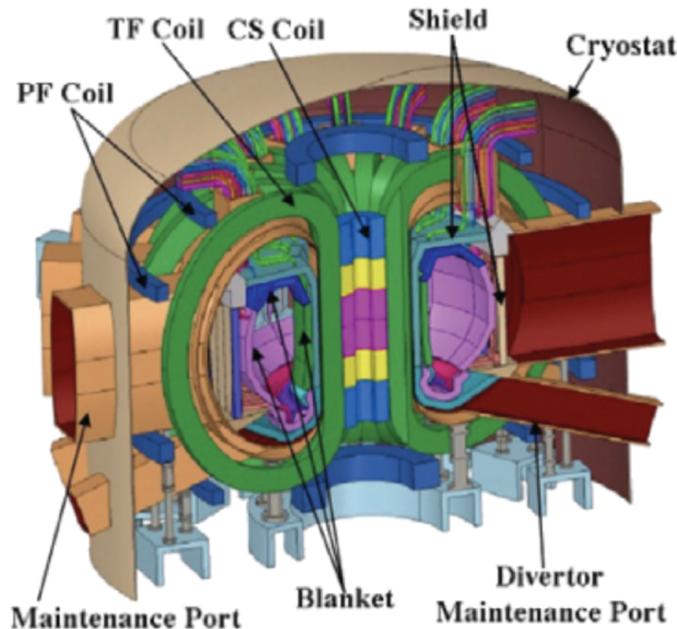


Figure 3-3 Cross-section Bird's-eye View of Demo-CREST [62].

### 3.2.1.3 ブランケット設計

Demo-CREST では ITER TBM における工学的知見を基に建設を行う観点から、ブランケットとして我が国が TBM として試験を行う水冷却/Be 増倍剤/ $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  増殖剤を構成要素とした設計がなされている[59]。Demo-CREST のブランケットモジュールの特徴は大型化によって中性子利用効率の最適化と、炉内機器の保守性の向上を図った点である。これにより設計 TBR として 1.1 [63]を達成すると共に、メンテナンス期間の短縮が見込まれている[58]。

### 3.2.1.4 発電システム設計

日渡ら(2006) [63]は、Demo-CREST の発電システムについて、ITER TBM における冷却材条件が PWR(加圧水型軽水炉)のそれと近いために、Demo-CREST の発電システムにも PWR の発電システムと類似のものが適用されると述べている。

## 3.2.2 SlimCS

## 3.2.2.1 システム設計

SlimCS は、”初期の小規模な発電から運転信頼性の確認、最終的には経済性までを一段階で見通しうる「発電実証プラント」概念の構築” [64]を目標に JAEA において概念設計された原型炉である。名称が示す通り、スリムなセントラルソレノイドコイル(CS)の採用により炉全体の小型化が図られた設計を特徴とし、大半径は 5.5 m、アスペクト比は 2.6 である。定常運転を目的として設計されており、システム設計は規格化 $\beta$ 値 4.3 において核融合出力 2.95GW、電気出力 1GW である [64]。

## 3.2.2.2 炉設計

SlimCS は高ベータおよび高楕円度をもつ炉心プラズマによって高出力密度を達成する設計を持ったトカマク炉であり、平均中性子壁負荷は  $3 \text{ MW/m}^2$  とされている [64]。SlimCS の鳥瞰断面図を Figure 3-4 に示す。

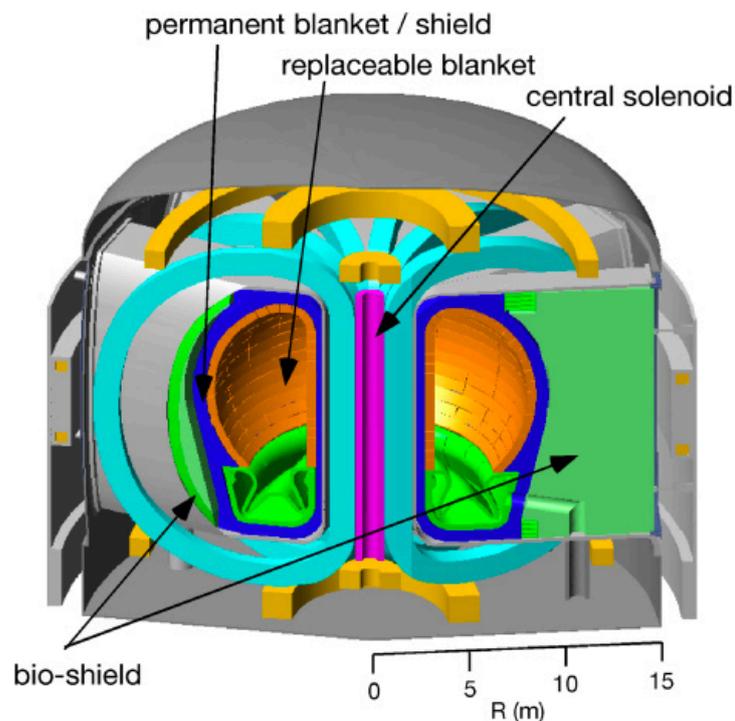


Figure 3-4 Cross-section Bird's-eye View of SlimCS [65].

3.2.2.3 ブランケット設計

SlimCS のブランケット設計では水冷却セラミック増殖ブランケットが採用されており、増倍材としては Be のバルクと  $B_{12}Ti$  のペブルを、増殖剤としては  $Li_4SiO_4$  ペブルを用いる。構造体は F82H、亜臨界条件(23-25MPa, 290-360 °C)での水冷却を想定しており、増殖剤・増倍剤の配置として、第一層目に増殖剤を配置し、後段では増倍剤と増殖剤のペブル混合層を用いる構造を採用している。設計目標 TBR は 1.05[64]。

3.2.2.4 発電システム設計

飛田ら(2010) [64]は、”PWR(冷却水条件は 15MPa, 285-325 °C)の延長技術と考えられるので、原型炉の発電システムは PWR にならって以下の構成にする”と記述の上、SlimCS の発電システムについて Figure 3-5 の設計を示している。

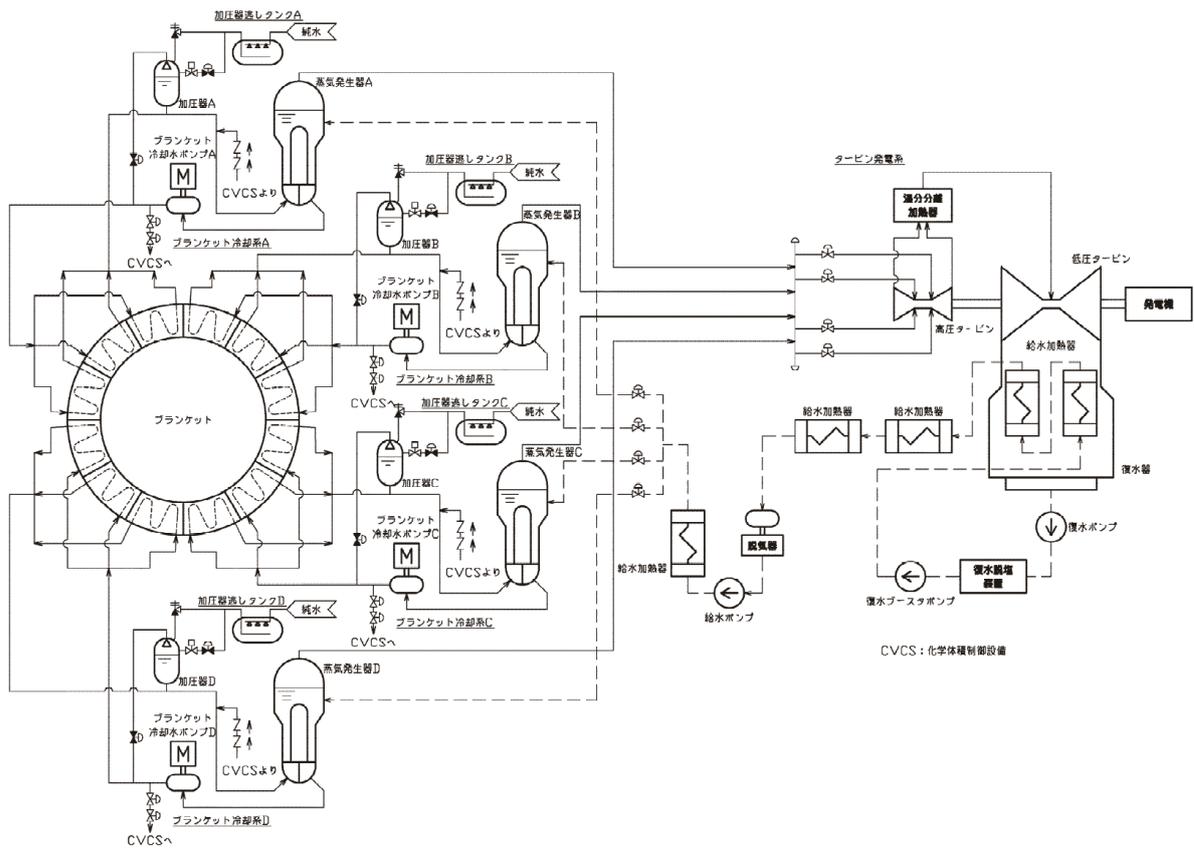


Figure 3-5 Electricity Generation System Design of SlimCS [64].

Figure 3-5 は、SlimCS の発電システムとして加圧器・CVCS を備えた主蒸気ループ4 系統による U 字蒸気発生器を用いたランキンサイクルが想定されていることを示している。即ち、現行の PWR の設計をほぼそのまま採用したものである。

### 3.2.3 EU DEMO

#### 3.2.3.1 システム設計

EU DEMO は、ヨーロッパにおける実用化前の最終段階として EUROfusion のもとで概念設計が進められている原型炉であり、数百 MW の電気出力とトリチウムの自己充足性を実証することを目的としている。本稿執筆時点では最終設計は確定していないものの、EU DEMO 2015 として検討されているシステム設計は、2 時間以上のパルス運転において核融合出力 2 GW、電気出力 500 MW である [66]。

#### 3.2.3.2 炉設計

EU DEMO として複数検討されている炉設計のうち、より早期に実現が可能とされるアスペクト比 2.6 の設計である DEMO1 では、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超伝導コイルにより 12 T を発生し、主半径 9.5 m のトカマク炉が想定されている [67]。

#### 3.2.3.3 ブランケット設計

EU DEMO において採用されるブランケット設計としては、現在、ヘリウム冷却ペブルベッド方式 (HCPB)、ヘリウム冷却リチウム鉛方式 (HCLL)、水冷却リチウム鉛方式 (WCLL)、デュアルクーラントリチウム鉛方式 (DCLL) の 4 方式が並行して検討されている [67]。

#### 3.2.3.4 発電システム設計

EU DEMO はパルス運転を目的として設計されていることから、発電システムに軽水炉の知見をそのまま応用することが出来ないことが早くから認識されている。従って発電システムについても詳細な設計検討が為されている。

Bubelis ら(2015) [68, 69]の報告においては、一次冷却系と二次冷却系の間に溶融塩中間熱交換器を設けることで蓄熱を行い、核融合反応休止中においても安定して発電を継続する設計が Figure 3-6 の通り示されている。

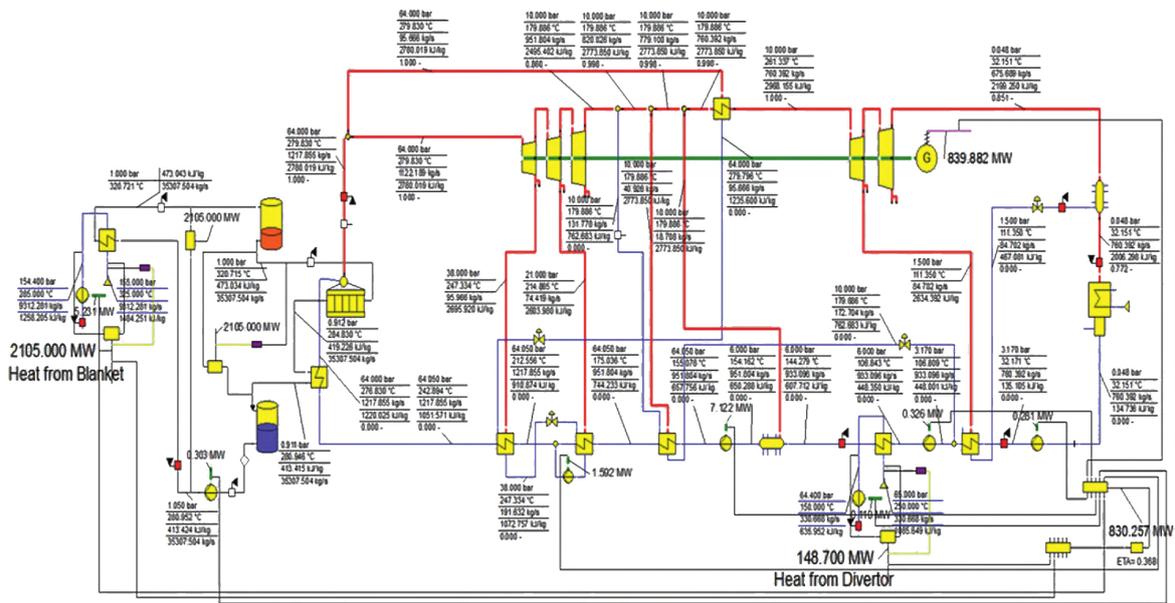


Figure 3-6 Electricity Generation System Design of EU DEMO [68, 69].

Figure 3-6 に示された設計では一次冷却材と蒸気発生器の間に溶融塩のホットプール並びにコールドプールが設置されており、核融合反応休止中もホットプールに貯蔵された高温溶融塩を蒸気発生器に送り続けることで、安定して発電を継続する設計であることが読み取れる。これは現在太陽熱発電所において用いられている発電システムである[70]。

### 3.3 結言

核融合エネルギー研究の現在における主目標は、その発電利用である。そこで本章では将来の核融合発電所において想定されるプラント構成について概観し、その必須構成要素が核融合プラズマを閉じ込める核融合炉、核融合炉から熱を取り出すブランケット、並びに取り出した熱を用いて発電を行う発電システムであることを確認した。さらに、核融合発電所の想定される環境負荷、安全性についても概説し、核融合発電の CO<sub>2</sub> 排出量は風力発電等と比して小さいと予測されること、また核的暴走の危険のない核融合炉には固有の安全性が備わっていることを述べた。

また、世界各国において実施された核融合発電プラントの概念設計について、特に電力中央研究所による Demo-CREST、JAEA による SlimCS、並びに EUROfusion による EU DEMO の3設計を選び出しそのレビューを実施した。結果、核融合発電プラントの設計にあたっては核融合炉について詳細な検討が各機関において為されている一方、水冷却定常炉を採用するプラントにおいては一般に現状の加圧水型軽水炉の発電システム技術がほぼそのまま適用できると見なされており、核融合炉において発生した熱を電気に変換する発電システムに関する研究が不十分であることが明らかとなった。

# 4 プラズマディスラプション発生時における核融合発電所挙動

## 4.1 導入

### 4.1.1 核融合発電所における発電システム検討の必要性

第2章における電力系統の分析は、核融合発電所の導入先である将来の電力系統は現在よりも不安定性を増す可能性が高いことを示した。これは新規電源の導入に際しては、今後電力系統の安定性にあたる影響についてさらに厳しく考慮せねばならないことを意味するものである。従って核融合発電所の設計にあたっては、核融合実験装置での見地に加え、電力系統への影響に関する研究を実施することが不可欠であると考えられる。

しかしながら定常炉、とくに日本が推進するトカマク型水冷却定常炉による核融合発電所においては「発電システムには PWR の知見がそのまま応用できる」という前提[63, 64]が広く共有されており、発電システムに関する詳細な検討が行われていないのが現状であることが3.2節における調査において示された。

核融合発電所が熱源とするプラズマは複雑系であり、振る舞いの完全な制御は難しい。かつ、トカマク型核融合炉には出力がミリ秒オーダーで瞬時に失われる「プラズマディスラプション」と呼ばれる現象の発生が予見される<sup>10</sup>など、その特性は従来の発電所における熱源と大きく異なる。このことは、水冷却定常核融合発電所には PWR の知見がそのまま応用出来るという従来の前提に疑問を投げかけるものであると筆者は考える。

---

<sup>10</sup> ヘリカル型核融合炉においてはプラズマディスラプションが発生しない一方、トカマク型炉には存在しない MHD 不安定性に起因するコラプスという現象の発生が観察されている。71. Mizuguchi, N., Y. Suzuki, and N. Ohyaibu, *Nonlinear Simulation of Collapse Phenomenon in Helical Plasma with a Large Pressure Gradient*. Plasma and Fusion Research, 2008. 3: p. S1034-S1034.

4.1.1.1 プラズマディスラプション

3.1.1.1 節において概述の通り、トカマク型核融合炉におけるプラズマの閉じ込めにおいてはトーラス方向にプラズマ中を流れるプラズマ電流が形成するポロイダル磁場が大きな影響を果たしている。プラズマディスラプションとは、このプラズマの閉じ込めに必要なプラズマ電流が瞬断することを特徴とした現象である[72]。プラズマディスラプションの原因はプラズマの閉じ込め性能が急速に劣化することによる温度低下と、それに起因する電気抵抗の増大によるものであると理解されている[73]。

従ってプラズマディスラプションにおいては熱崩壊とプラズマ電流崩壊の2つの現象が進行するが、その時定数はミリ秒単位である。比較的早く進行するプラズマディスラプションの典型的な観測例について Figure 4-1 に示す[74]。Figure 4-1 は実際に観察された比較的進行の早いプラズマディスラプションについて、横軸に時間を、縦軸にプラズマ電流をとって示したものであり、プラズマ電流  $I_p$  が10ミリ秒程度で消失している様子が表されている。

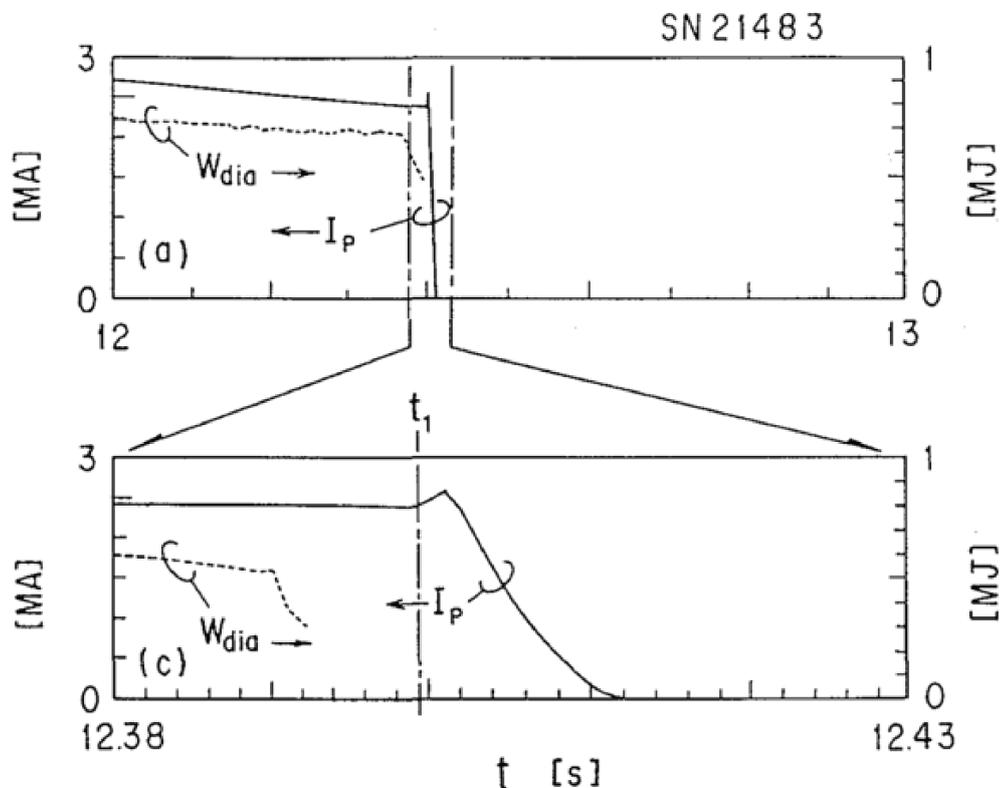


Figure 4-1 Typical Waveforms of a Relatively Fast Disruption (Modified from [75]).

## 第4章 プラズマディスラプション発生時における核融合発電所挙動

プラズマディスラプション発生時には核融合反応が瞬時に停止する。このことは、プラズマディスラプションの発生時には、発電所の熱源もまたミリ秒の時定数をもって急速に失われることを意味する。

現状のトカマク型核融合炉においては、一定の頻度でのプラズマディスラプションが発生することは避けられないと考えられている[73]。我が国においては、将来の目標として、原型炉におけるプラズマディスラプションに起因する（ものを含む）緊急停止頻度につき「0.5回／年以下」[76]という値が設定されている。

一方、3.2.1 節において概観した Demo-CREST においては負磁気シアプラズマ運転により閉じ込め性能を向上させる設計が行われているなど、核融合発電所の実用化に向け、プラズマディスラプションの発生頻度を可能な限り低減する不断の研究開発が続けられている[77]。さらに、プラズマディスラプションの発生に先駆け Precursor として観測される信号の変化を正しく捉え判別することでプラズマディスラプション発生の予測を行う研究が併せて行われており、近年ではニューラルネットワーク方を用いより精度良く発生の予測が為されるようになってきている[78, 79]。さらに、熱消滅に至る前に磁場を制御することでプラズマディスラプションの発生自体を回避する手法についても研究がなされており、一例として電子サイクロトロン波を用いた加熱により磁気島の成長を抑制する手法がある[73, 80]。同様に熱消滅後であっても電流消滅を回避し、プラズマを安定状態に戻す試みもあり、この例として ECRF 加熱を行う手法が研究されている[73, 81]。これらの研究の進展により、技術の習熟とともに将来的には核融合発電所におけるプラズマディスラプションの発生頻度がゼロに近づく可能性も存在する。

### 4.1.1.2 軽水炉における緊急停止との比較

軽水炉においてはこのような極めて急速な熱源の喪失現象は存在しない。軽水炉において想定され得る最も早く熱源が失われるケースは原子炉スクラムによる制御棒全挿入であるが、この場合においても反応停止には 5 秒程度の時間がかかる上、停止後においても定格出力の 7~8%程度に相当する崩壊熱が発生する[82]。一方、核融合炉におけるプラズマディスラプションにおいては、プラズマの消失にかかる時定数が数十ミリ秒程度と極めて短い上、停止直後の崩壊熱もおおよそ定格出力の

1%程度と推計されており[83]、プラズマディスラプションは失われる炉熱出力の観点からも軽水炉における原子炉スクラムとは大きく挙動の異なる現象である<sup>11</sup>。

### 4.1.2 本章の目的

以上から、プラズマディスラプション発生時における発電システムの振る舞いは核融合発電所に特有のものであり、従来の知見が適用できない可能性が存在する。これは、PWRの発電システムにおいては、プラズマディスラプションのような極めて早い熱源の消失現象は想定されていないためである。従って従来のPWR向け発電システムを核融合発電所に応用した場合、特にプラズマディスラプションの発生時において、予見されない振る舞いを引き起こす可能性が否定できない。

トカマク炉においてプラズマディスラプションの発生を完全に防ぐことは、特に導入の初期段階においては難しいとされている[73]。従ってプラズマディスラプション発生時のプラントへの影響並びに電力系統への影響の大きさによっては、本現象が核融合発電所の導入の障壁となることも有り得ると言える。

以上の理由から本章においては、核融合発電所の実現へ向けた研究開発に資するため、熱交換装置、蒸気発生装置並びに発電機を含んだ核融合発電所全体のシミュレーションモデルを構築し、PWRの発電システムを備えた核融合発電所のプラズマディスラプション発生時における振る舞いを評価する。

これにより、PWRの発電システムを定常炉核融合発電所に採用する妥当性について評価するとともに、プラズマディスラプション発生時における核融合発電所の運用につき検討を加えることが本章の目的である。

### 4.1.3 先行研究

パルス運用の核融合発電所については発電システム研究の重要性が近年認識され始めており、複数のシミュレーション研究が実施されている。Harrington(2015)[84]はパルス運転が想定されるEU DEMOの設計の基礎的な知見の収集のため、水冷却並びにヘリウム冷却のパルス運転(2-4時間運転、1時間休止)を実施する発電システムについてModelica上でシミュレーションを実施している。Harringtonの発

---

<sup>11</sup> この点はコラプス等のヘリカル型核融合炉における緊急停止事象においても同等と考えられるが、本章においては扱わない。

電システムモデルは極めて基礎的なものであるが、パルス運転の dwell 時における発電システムへの影響について定量的に報告しており、発電システム設計検討におけるシミュレーションモデルの有用性を示したものである。Kiviluoto ら(2016) [85] は同様の目的のため、EU DEMO で想定されるパルス運転での発電システムについて Harrington とは独立して Apros 上でシミュレーションモデルを構築している。Kiviluoto らの発電システムモデルは Harrington のそれとは異なり溶融塩蓄熱装置を前提としており、シミュレーション結果は安定的な発電出力の維持のために溶融塩蓄熱装置が有効であることを示唆するものである。さらに Malinowski ら(2017) [86] は、上に示した議論をもとにさらに詳細なモデルを GateCycle 上で構築し、溶融塩蓄熱装置を活用したパルス運転のシミュレーションを実施している。結果、安定的な発電に必要となる溶融塩蓄熱装置の装置容量につき検討結果が示されている。

これらの先行研究が示すのは、現状における核融合発電所における発電システムモデルに基づく検討は、EU DEMO におけるパルス運転の実現可能性の検討の 1 点に集中していることである。一方で、定常炉について詳細な発電システムを検討した研究は見当たらず、従ってシミュレーションモデルの構築例も存在しなかった。加えて、定常炉・パルス炉に関わらず、プラズマディスラプションについて、発電システムへの影響をモデルにより論じた論文についても確認できなかった。

## 4.2 方法

### 4.2.1 核融合発電所シミュレーションモデルのシステムパラメータ設定

本研究において模擬する核融合発電所は、第3章において概観した現状の設計トレンドを鑑み、「水冷却トカマク炉・定常運転・発電端電気出力 1,200 MW」とし、Table 4-1 に示す設計目標パラメータを備える Figure 4-2 に示すプラントとした<sup>12</sup>。

---

<sup>12</sup> Figure 4-2 は発電所の蒸気ループのうち模式的に 1 ループを抜き出して示したものであり、実際の主蒸気ループは 4 ループ存在する。

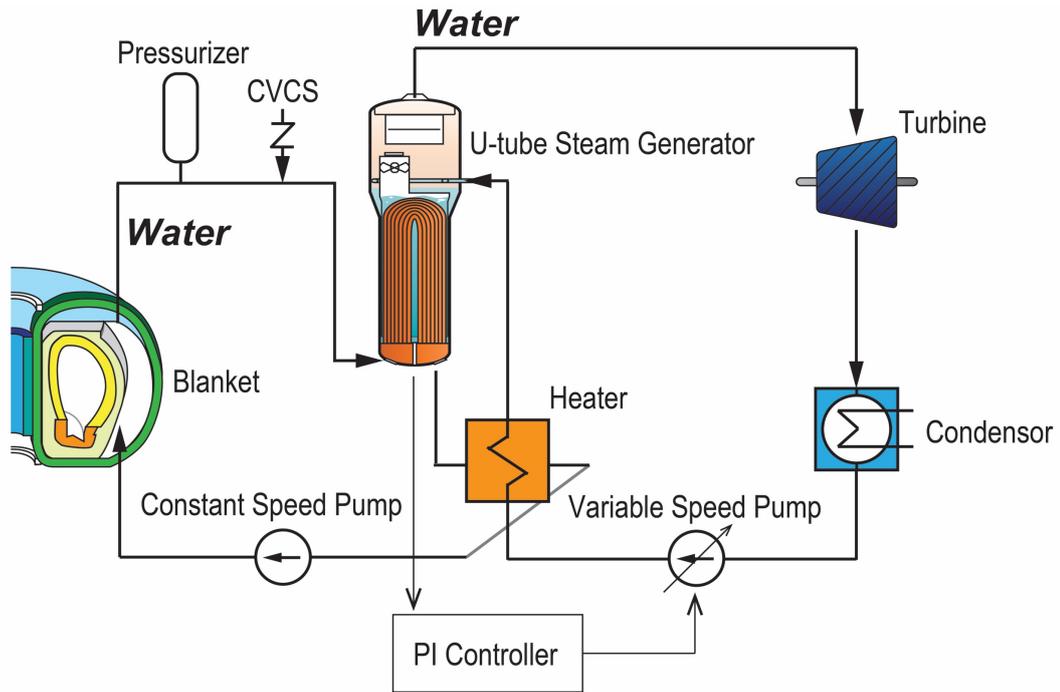


Figure 4-2 Plant Diagram of the Simulated Nuclear Fusion Power Plant [87, 88].

Table 4-1 Target Values of the Nuclear Fusion Power Plant System Parameters [87].

Parameter	Target Value	Unit
Operation Type	Steady-State	
Reactor Type	Tokamak	
Blanket Type	Water-cooled Ceramic Breeder	
Fusion Output	2,801	MW
Electrical Output	1,200	MW
Primary Coolant	Water	
In/out Temp.	286/325	°C
Pressure	15.5	MPa
No. of Secondary Steam Loop	4	

#### 4.2.2 核融合発電所シミュレーションモデル構築環境

一般にプラントモデルの構築環境には産業界向けのものが多く、従って高価かつ拡張性に乏しい側面が存在する。一例として先行研究において用いられているシミュレーションモデル構築環境には産業用の Apros や GateCycle などのソフトウェアが多いが、これらのソフトウェアはライセンス料として数百万円にのぼる費用が必要な場合がある上[89]、構築されたモデルは専用のソフトウェアでしか読み取ることが出来ず、アカデミックな環境において基礎研究に柔軟に用いるには最適でない。

よって本研究においては、学术界における拡張性、アクセシビリティを担保するため、オープンソースのモデリング言語である Modelica 言語を使用の上、同じくオープンソースのライブラリである Thermopower version 2.1 [90, 91]を用いて核融合発電所モデルを構築することとした。

### 4.3 核融合発電所シミュレーションモデル

#### 4.3.1 核融合炉モデル

本研究の核融合発電所で採用するブランケットについては水冷却固体冷却ブランケットを備えたトカマク型定常炉を想定し、JAEA による ITER TBM 設計データ [92]を基に、Figure 4-3 に示す設計とした。ただし本モデルではダイバータについては模擬を行わず、ダイバータからの排熱についても活用しないものとした。

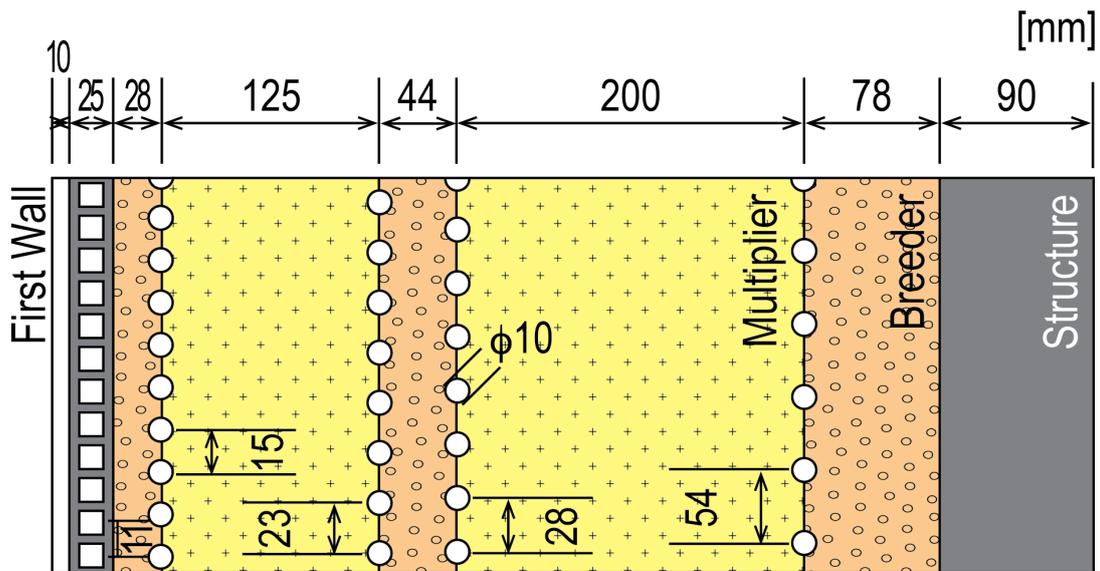


Figure 4-3 Cross-section Diagram of the Blanket Model. [87, 92].

本研究においてはプラズマの振る舞いについてはシミュレーションを行わず、単純な入力パターンとして中性子壁負荷並びに熱負荷を与えるモデルとする。その上で、プラズマディスラプションについては、発生時に中性子壁負荷並びに熱負荷がステップ状にゼロになるものとして単純化してモデル化している。仮定した中性子壁負荷、熱負荷、並びにブランケットに採用した材料とその物性値について、Table 4-2 に示す。

Table 4-2 Parameters of the Blanket Model [87].

Parameter	Value	Unit
First Wall Material	Tungsten	
Structure Material	F82H	
Neutron Multiplier	Be Pebble	
Tritium Breeder	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> Pebble	
First Wall Surface	768.2	m <sup>2</sup>
Neutron Wall Load	3.0	MW/m <sup>2</sup>
Surface Heat Flux	0.5	MW/m <sup>2</sup>
Tungsten Density [93]	19,250	kg/m <sup>3</sup>
Tungsten Specific Heat Capacity [93]	138	J/(kg K)
Tungsten Thermal Conductivity [93]	173	W/(m K)
F82H Density [94]	7,890	kg/m <sup>3</sup>
F82H Specific Heat Capacity [94]	660	J/(kg K)
F82H Thermal Conductivity [94]	32.5	W/(m K)
Be Density [93]	1,850	kg/m <sup>3</sup>
Be Specific Heat Capacity [93]	1,925	J/(kg K)
Be Pebble Thermal Conductivity [95]	2.8	W/(m K)
Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> Density [96]	3,430	kg/m <sup>3</sup>
Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> Specific Heat Capacity [96]	1,321	J/(kg K)
Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> Pebble Thermal Conductivity [95]	1.2	W/(m K)
Pebble Packing Fraction	0.74	

ブランケットにおける発熱については第一壁熱負荷、入射中性子による加熱に加え、崩壊熱並びに熱放射についても考慮に入れモデル化を行った。設定された中性子壁負荷並びに熱負荷はそれぞれ 3.0 MW/m<sup>2</sup> および 0.5 MW/m<sup>2</sup> である。中性子による核加熱並びに崩壊熱の密度については Tsuru ら(2009)[97]による計算を参照し、熱放射については Takase ら(1998)[98]の試算を参考に 200 °C の同面積の表面への放射とした。これにより設定されたブランケットの発熱・放熱モデルを Figure 4-4 に示す。

第4章 プラズマディスラプション発生時における核融合発電所挙動

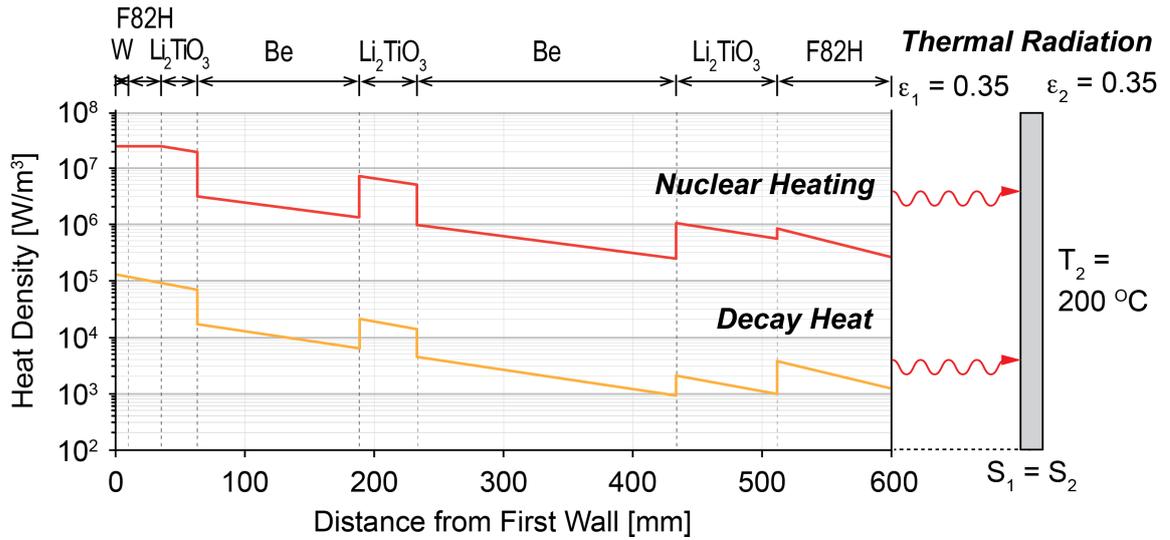


Figure 4-4 Nuclear Heating, Decay Heat and the Thermal Radiation of the Blanket Model [87, 97-99].

以上の仮定に基づいて構築された核融合ブランケットモデルを Figure 4-5 に示す。本モデル構築にあたっては Modelica 標準ライブラリに加え、Thermopower version 2.1 に収録された一次元流コンポーネント[90]が用いられている。

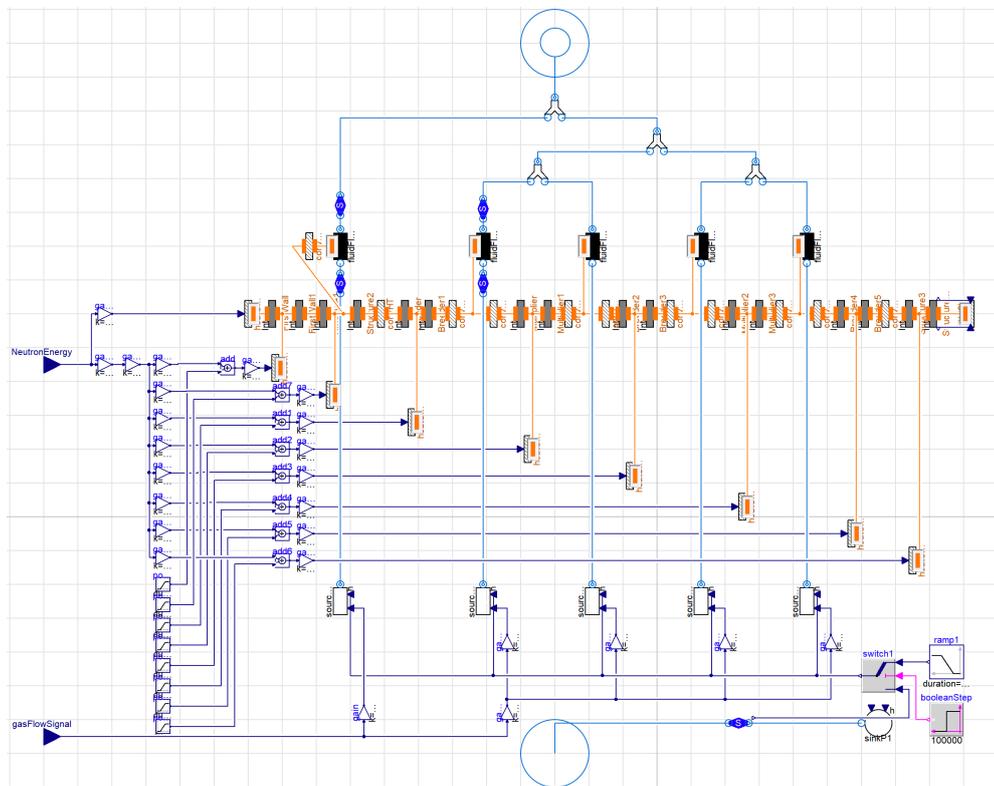


Figure 4-5 Modelica Model of the Blanket.

### 4.3.2 一次冷却系モデル

一次冷却系については、TBM 設計データ並びに既存の加圧水型軽水炉の運転データを参考にモデル化を実施した[82, 92]。モデルの簡易化のため配管による圧力損失については考慮しないこととし、かつ理想的な挙動の加圧器・化学体積制御系 (CVCS) を仮定することで、ブランケット入口において常に定圧・一定流速の条件のもとでシミュレーションモデルを構築した。また、ブランケット出口から蒸気発生器までの配管長さは 20 m と設定された。構築された一次冷却系モデルの定常状態におけるパラメータを Table 4-3 に示す。

Table 4-3 Parameters of the Primary Coolant Model.

Parameter	Value	Unit
Coolant Medium	H <sub>2</sub> O	
Coolant Pressure	15.5	MPa
Coolant Inlet/Outlet Temperature	286.0 / 325.2	°C
Coolant Flow Rate (per Loop)	4,099	kg/s

### 4.3.3 蒸気発生器モデル

蒸気発生装置については既存の加圧水型軽水炉における設計[82, 100]を参考に、Figure 4-6 に示す U 字蒸気発生器を採用した。設定されたモデルの主要パラメータについて Table 4-4 に示す。

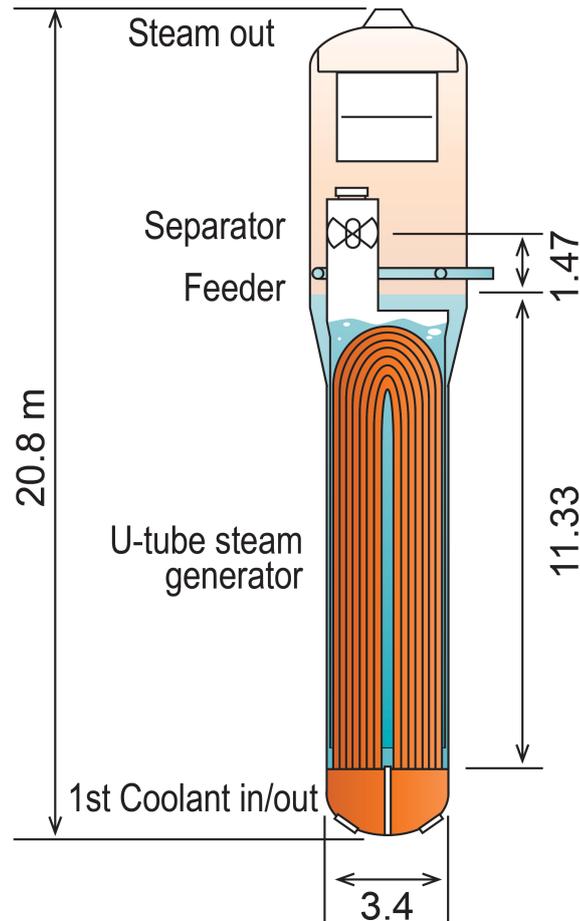


Figure 4-6 Cross-section Diagram of U-tube Steam Generator Model [101, 102].

Table 4-4 Parameters of the U-tube Steam Generator Model [101, 102].

Parameter	Value	Unit
Number of U-tubes	6,000	
Average Length of U-tubes	22.0	m
Diameter of U-tubes	20.0	mm
Wall Thickness of U-tubes	1.3	mm
U-tube Wall Material [103]	INCONEL 690	
U-tube Wall Density [103]	8,190	kg/m <sup>3</sup>
U-tube Wall Specific Heat [103]	497	J/(kg K)
U-tube Wall Thermal conductivity [103]	17.3	W/(m K)
Heat Exchange Surface	8,290	m <sup>2</sup>
Heat Transfer Coefficient	6,000	W/(m <sup>2</sup> K)
Primary Coolant Volume	41.45	m <sup>3</sup>
Secondary Coolant Volume - Nominal	42.10	m <sup>3</sup>
Secondary Coolant Volume - Full	65.60	m <sup>3</sup>

U字蒸気発生器の Modelica モデル化に際しては、Thermopower version 2.1 に収録された Fluegas ボイラーモデル[90]における一次側流体を水となるようモデルを改変し、Figure 4-7 の通りモデルを構築した。

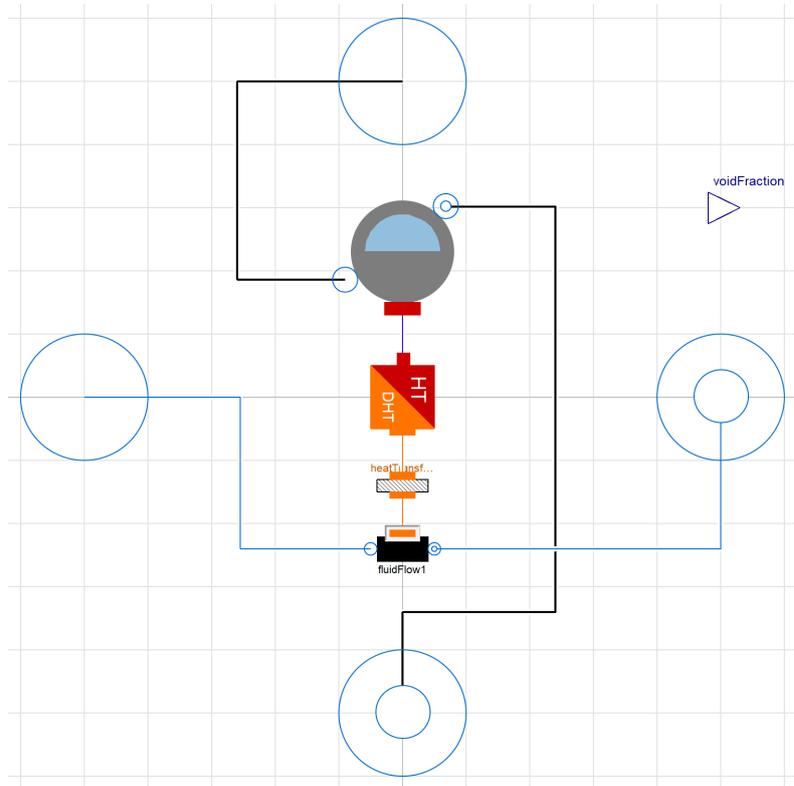


Figure 4-7 Modelica Model of the U-tube Steam Generator [90].

#### 4.3.4 給水加熱器モデル

給水加熱器についてはシェルアンドチューブ型・対向流の熱交換器を想定し、Table 4-5 の通りのパラメータを設定した。Modelica モデル化に際しては、Thermopower version 2.1 に収録された気体—水熱交換器[90]について、一次側流体を水となるようモデルを改変し、Figure 4-8 の通りモデルを構築した。

Table 4-5 Parameters of the Shell-and-Tube Heater Model.

Parameter	Value	Unit
Radius of the Shell	2.0	m
Length of the Shell	21.0	m
Radius of the Tubes	61.4	mm
Total Length of the Tubes	18.0	m
Wall Thickness of Tubes	1.0	mm
Number of Tubes	150	
Tube Wall Material	SUS 304	
Tube Wall Density [104]	8,030	kg/m <sup>3</sup>
Tube Wall Specific Heat [104]	500	J/(kg K)
Tube Wall Thermal conductivity [104]	16.3	W/(m K)

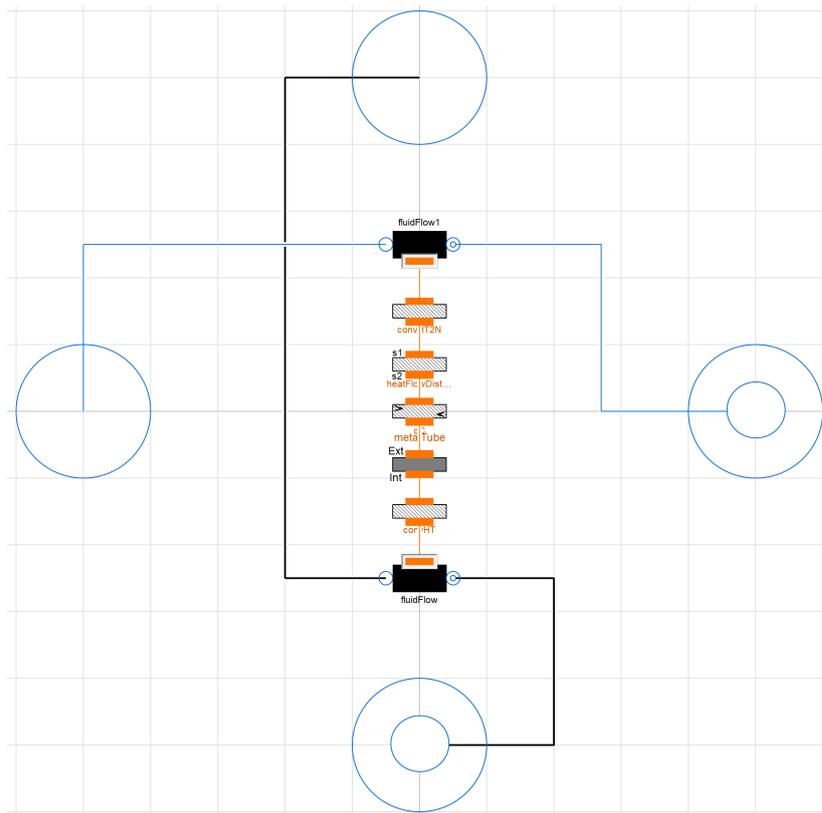


Figure 4-8 Modelica Model of the Shell-and-tube Heater [90].



4.3.6 制御系モデル

制御系は単純な PI 制御とし、U 字蒸気発生器におけるボイドフラクションを 35.8%に保つよう二次系循環ポンプの回転数を制御した。設計された制御器のパラメータを Table 4-7 に示す。

Table 4-7 Parameters of the Feed Water Pump Controller.

Parameter	Normal Response	Fast Response
Process Variable: PV	Void fraction at steam generator	
Control Variable: CV	Rotation of the feed water pump	
Nominal Rotation	1,500 rpm	1,500 rpm
Proportional Gain, Kp	-0.62	-1.65
Integral Time, Ti	310 sec	16 sec

4.3.7 シミュレータ条件

Thermopower version 2.1 では OpenModelica 使用時におけるトランスレーションエラーが報告されていることから、Modelica 言語のモデリング環境には Dassault Systèmes®社製の Dymola Version 2017 (32bit)を用いた。開発画面を Figure 4-10 に示す。実行環境には 2.7 GHz Intel Core i7 /16GB 2133 MHz LPDDR3 Memory を搭載した MacBook Pro (15-inch, 2016)を用いた。ソルバには許容値 0.001 の DAE マルチステップ DASSL 法を用い、パラメータの安定化のための 120,000 秒を含めシミュレーション時間計 125,000 秒についてステップ数は 1,000,000 step とした。

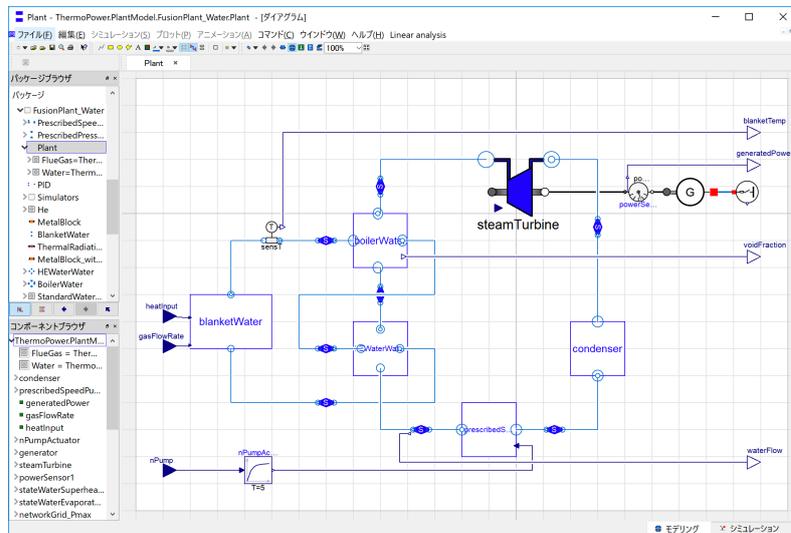


Figure 4-10 A Screenshot of Dymola Simulation and Modeling Environment.

## 4.4 結果

### 4.4.1 定常運転時における核融合発電所挙動

構築された核融合発電所モデルを用い、始めに定常運転時のシミュレーションを実施した。定常運転時における電気出力は 1,200.0 MW、核融合出力は 2,801.4 MW であった。定常運転時における一次/二次冷却材の状態を Figure 4-11 に示す。

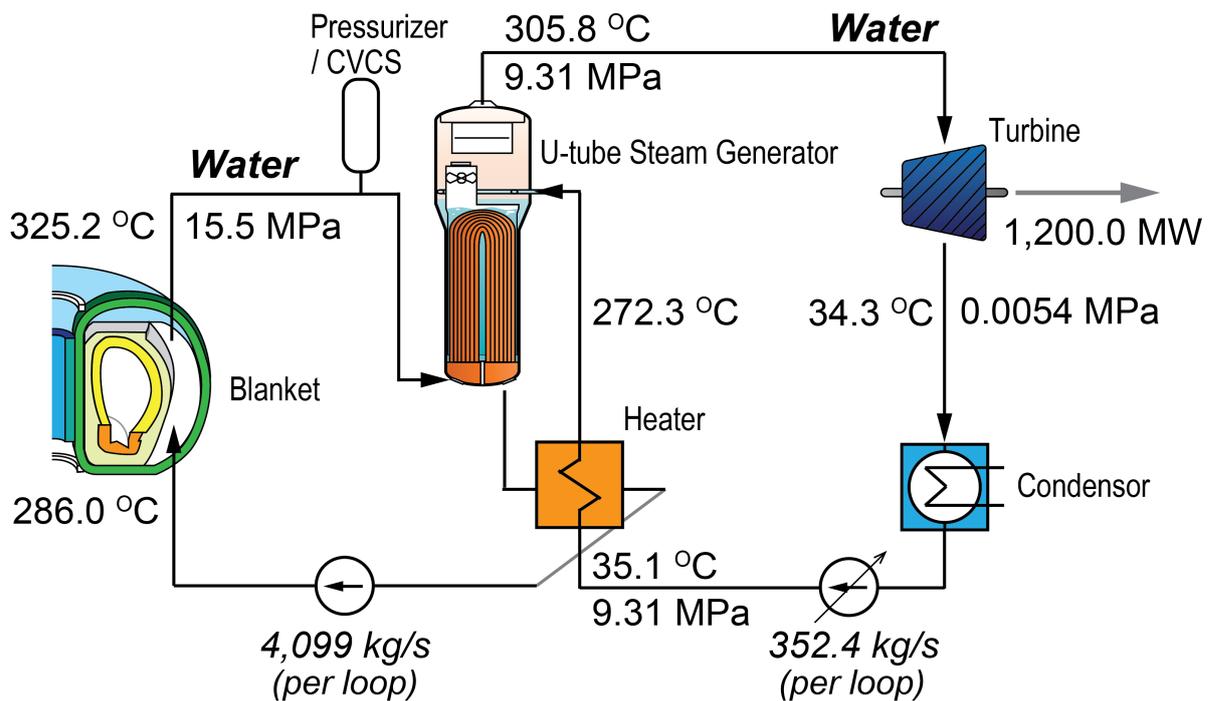


Figure 4-11 Steady-state Operating Conditions of the Primary/Secondary Coolant.

### 4.4.2 プラズマディスラプション発生時の核融合発電所挙動

プラント定常運転時にプラズマディスラプションが発生した場合、ブランケット温度、一次冷却系温度に急激な低下が見られ、その結果として発電出力が急速に減少した。Figure 4-12 に一次冷却系温度並びに発電端出力の時間推移を示す。Figure 4-12 (a)において一次冷却材のブランケット入口/出口温度を、Figure 4-12 (b)において発電端出力を示している。ブランケットの熱容量は 1,999 MJ/K、一次冷却材インベントリ量は 499.2 m<sup>3</sup> であり、ブランケット出口温度はプラズマディスラプション後 120 sec で 43.5 °C、発電端出力は 364.8 MW 低下している。

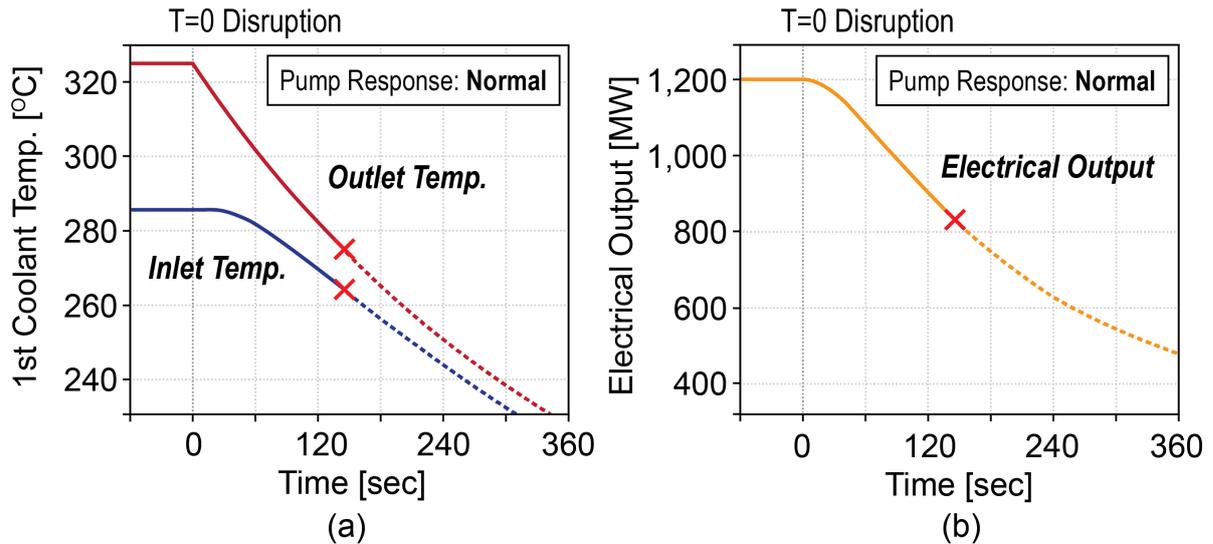


Figure 4-12 Plant Behavior upon Disruption. (a) Primary Coolant Temperature (b) Electrical Output

しかしながら、プラズマディスラプション発生時における最も重大な挙動は蒸気発生器において観察された。一次冷却材温度の急激な低下は蒸気発生器における蒸気発生量の急減と、それに伴う水位の急激な上昇につながった。Figure 4-13 にプラズマディスラプション発生後の蒸気発生器水位の推移を示す。

Figure 4-13 はプラズマディスラプション発生を  $T = 0$  として横軸に時間を、縦軸に定常時推移を 0 m とした蒸気発生器における推移を示している。また、水位の理解のため、左側に蒸気発生器を並べて描いている。本計算は、蒸気発生器に於ける水位がプラズマディスラプション発生後 144.7 sec において汽水分離器水位( $L_0 + 1.47$  m)を超え、溢水することを示している。

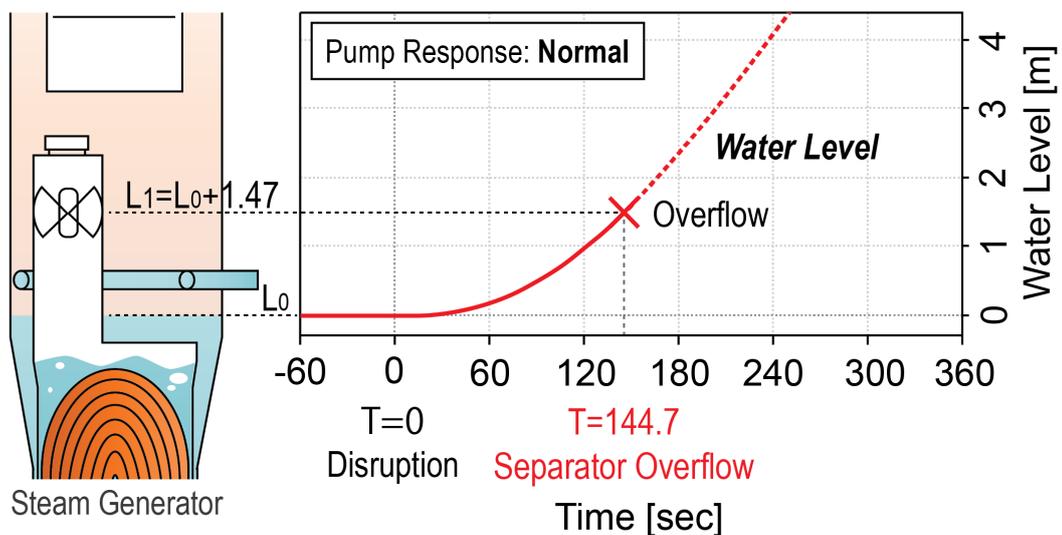


Figure 4-13 Water Level at Steam Generator upon Disruption (Normal Response).

蒸気発生器における溢水を防ぐ手段として考えられる最も簡単な方法は、プラズマディスラプション発生時に蒸気発生器への給水量を速やかに減少させることである。この目的のため、緊急対応のため反応速度を早めた PI 制御器を設計し (Table 4-7 Fast Response)、これを用いて二次冷却材ポンプを制御した結果を Figure 4-14 に示す。

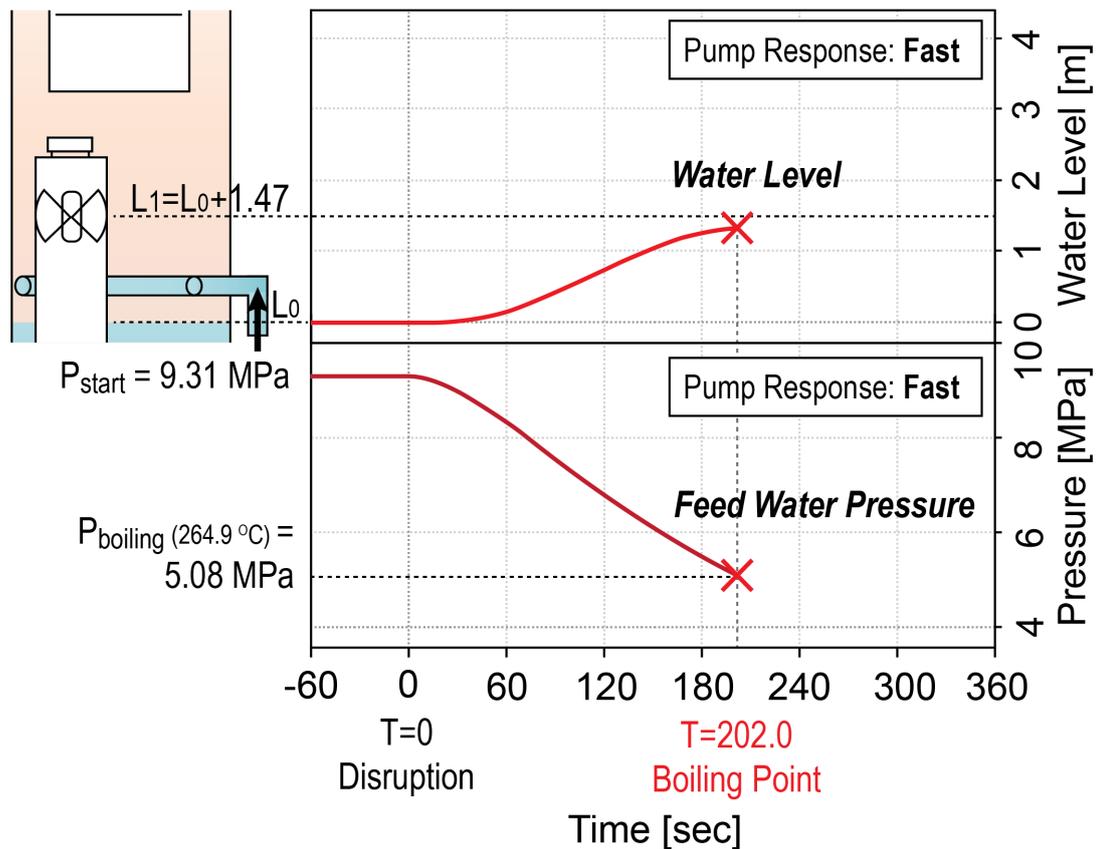


Figure 4-14 Water Level at Steam Generator upon Disruption (Fast Response).

Figure 4-14 においては横軸をプラズマディスラプション後の時間とし、上段に蒸気発生器における水位を、下段に二次冷却材温度・圧力を示している。ポンプの応答速度の向上により、プラズマディスラプション発生時には蒸気発生器への給水が急速に減らされ、蒸気発生器水位は汽水分離器に到達する前に上昇が止まっていることが示されている (Figure 4-14 上段)。しかしながら一方、給水が急速に減ったことにより二次冷却材圧力は急速に低下し、結果 202.0 sec 後に冷却材圧力が 5.08 MPa (264.9 °C における沸点) にまで低下し、二次冷却系が沸騰を引き起こしている (Figure 4-14 下段)。

## 4.5 考察

### 4.5.1 定常時発電システム条件の PWR との比較

第3章において概観した通り、現状においては多くの設計で、将来の核融合発電所においては PWR の発電システムが適応できるとしている。そこで、公益財団法人福井原子力センター出版資料[105]を基に、本核融合発電所モデルと敦賀第二発電所(PWR)の冷却材条件を比較し Table 4-8 に示す。本比較は一次冷却材温度並びに圧力について本核融合発電所モデルと敦賀第二発電所の運用値との間に差異が少ないことを示しており、核融合発電所における発電システムについて現状の PWR における運用条件と齟齬の無い条件で定常運用が可能であることを示唆している。

Table 4-8 Comparison of Coolant Operating Conditions: Fusion vs. PWR Plant.

Parameter		Nuclear Fusion	Tsuruga No.2 (PWR)[105]
Primary Coolant	Temp. – Reactor In	286.0 °C	289 °C
	Temp. – Reactor Out	325.2 °C	325 °C
	Pressure	15.5 MPa	15.4 MPa
	No. of Loops	4	4

### 4.5.2 プラズマディスラプション発生時における核融合発電所運用シナリオ

しかしながら一方、4.4.2 節におけるシミュレーション結果はプラズマディスラプション発生時、核融合発電所においては軽水炉より遥かに短い時定数で事態が進展することを示している。給水ポンプの制御条件が通常の場合においては 144.7 秒後に蒸気発生器において溢水が発生し、応答速度を早め給水を速やかに減少させた場合には 202.0 sec において二次冷却剤の突沸が発生している。

このことは、プラズマディスラプション発生時にはプラント緊急停止が避けられず、発電の継続を考慮すること無く、直ちに緊急対応を実施するインターロックを組むべきであることを強く示唆している。これは、スクラム発生後も最大数十秒間の発電継続が場合によって可能である軽水炉とは異なる挙動である[82]。

考え得るインターロックとしては、1) プラズマディスラプション発生時には一次冷却系ポンプは平常時同様に定格循環とする一方、2) 蒸気発生器への給水を可能な限り速やかに減らし、3) 併せて二次系蒸気圧力を上昇させることにより二次冷却系

の突沸を防ぐとともに二次系の飽和蒸気温度を向上させ、4) 必要に応じタービンバイパス弁を開けることで蒸気を直接復水器に送る運用がある[84, 106]。これにより蒸気発生器における溢水並びに突沸を防ぎ、かつ一次冷却系並びにブラケットの温度を最大限維持できる可能性がある。

### 4.5.3 本核融合発電所シミュレーションモデルにかかる今後の課題

本核融合発電所モデルは PWR の発電システムを核融合発電所に採用する妥当性について評価するとともに、プラズマディスラプション発生時における無対策時の発電システム挙動を評価することを目的としている。従って制御系については単純に二次系の循環ポンプの PI 制御のみを仮定しており、プラズマの出力についてはプラズマディスラプションを想定した単純なステップ減少のみを模擬し、ブラケットモデルについては Inboard/Outboard の厚さの違いを無視するなど、多くの簡易化が為されている。本簡易化は、本章で設定された目的について本質的な示唆を得るのに十分なモデルを提供する一方、以下の疑問に対しては答えを提供し得ず、今後さらなる開発が必要であると言える。

4.5.2 節において筆者はプラズマディスラプション発生時の即時解列の必要性を示し、併せて、即時解列後のプラント運用についての提案を行った。しかしながら、本章において開発したモデルでは提案したプラント運用を完全に模擬することが出来ず、従って即時解列後の最適なプラント運用についての議論に用いるには不十分である。今後、タービンバイパスなど模擬に必要な装置を適宜モデルに追加する必要がある。

本モデルにおいてはプラズマの挙動としてプラズマディスラプションのみを想定し、プラズマ出力を単純なパターンとして模擬した。しかしながら核融合発電所における緊急停止の要因はプラズマディスラプション以外にも複数存在すると考えられる。これらの緊急停止事象の多くは現状の軽水炉における既存の事象とある程度の共通性が見られると予測される一方、プラズマディスラプション以外にも核融合発電所に特異な緊急停止要因が存在する可能性が存在する。これらの要因について、事象の発生後数十秒間は発電継続が可能であるのか、それともプラズマディスラプションと同様即時解列が必要であるのかを検討することが今後必要と考えられ、イベントツリー等によるリスク評価と併せ、個別の事象におけるプラント挙動を検討できるよう必要に応じ新たなシナリオ設定やモデルの拡張を行う必要がある。

### 4.6 結言

3.2節における核融合発電プラントの設計レビューは、定常水冷却核融合発電所には PWR の発電システムがそのまま適用できると見なされており、発電システムについての具体的検討がほとんど存在しないことを見出した。しかしながら核融合にはプラズマのディスラプション現象が存在するなどその特性は従来の熱源と大きく異なるため、核融合発電所の実用化に向け新たに発電システムの具体的検討が不可欠であると考えられた。

そこで本章においては、将来の核融合発電所の想定として「定常運転・水冷却トカマク炉・発電端電気出力 1,200 MW」を設定し、この運転を再現する核融合発電所シミュレーションモデルを Modelica 言語上に Thermopower version 2.1 ライブラリを利用して構築した。その後、本シミュレーションモデルを用いることで、PWR の発電システムを核融合発電所に採用する妥当性について評価するとともに、プラズマディスラプション発生時における発電所挙動が評価された。

結果は定常運転時においては核融合発電所の発電システムについて PWR における発電システムと齟齬の無い条件での運用が可能であることを確認した。その一方で、PWR の発電システムを採用した核融合発電所ではプラズマディスラプション発生後 144.7 秒において蒸気発生器の溢水が発生することが示唆され、核融合発電所におけるプラズマディスラプションは PWR における緊急停止（トリップ）より急速に事態が進展することを示した。これにより、核融合発電所はプラズマディスラプション発生時においては即時解列が必要であると結論づけられた。

定常トカマク核融合発電所のシミュレーションモデルは今回初めて構築されたものであり、現状のモデルにおいては再現可能なシナリオが限られるという課題が存在するものの、このようなモデルは核融合炉の計装制御の観点からも必要不可欠であるとの指摘も存在するなど[107]、本モデルは今後、必要となる用途に応じ適宜拡張を行うことで、核融合原型炉開発に向け汎く有用な成果であると考えられる。加えて、プラズマディスラプションが核融合発電所の発電システムに与える重大な影響を指摘したのは本研究が初めてである。解析結果は従来の定常水冷却核融合発電所設計についてその設計を見直す必要があることを示唆するものであり、今後の核融合発電所開発計画に対して少なからざる影響を与える知見であると考えられる。

#### 第4章 プラズマディスラプション発生時における核融合発電所挙動

本章には、出版社の規約並びに許諾に基づき、筆者らによる以下の発表文献を再構成した内容が含まれている。[87] Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Plasma Control Requirements for Commercial Fusion Power Plants: A Quantitative Scenario Analysis With a Dynamic Fusion Power Plant Model*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018. PP(99): p. 1-6.© 2018 IEEE. [88] Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Environmental Life Cycle Assessment of High Temperature Nuclear Fission and Fusion Biomass Gasification Plants*. Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, 2017: p. 17582-17582.

# 5 電力系統過渡安定度にかかる核融合発電所導入制約の検討

## 5.1 導入

### 5.1.1 電力系統への受容性に関する課題

第4章における解析結果は、プラズマディスラプション発生時において核融合発電所を電力系統から即時解列する必要性を新たに示した。現状の原型炉戦略においてはプラズマディスラプションに由来するものを含む緊急停止回数について0.5回/年という目標が定めているものの[76]、即時解列が電力系統に与える影響の大きさによっては、2年に1度の頻度で系統に大きな擾乱をもたらす核融合発電所を社会が受容しない可能性があると言わねばならない。

核融合のような新たな発電技術を社会に成功裏に導入するためにはその導入先となる将来社会の有り様を予測し、その受容性に適合する方向へとその研究開発の舵を切らねばならない。2.2節における分析は将来の電力系統が現在よりも不安定化し電力系統の過渡安定度にかかる制約が現在より厳しくなると予測しており、従ってプラズマディスラプションにかかる即時解列の必要性は、今後の核融合導入戦略に対し従来予期されていない重大な影響を与える可能性がある。故に核融合発電所の将来社会への成功裏の導入のため、この新たな懸念に関し可能な限り早い段階から定量的考察を実施しておくことが重要であると考えられる。

### 5.1.2 本章の目的

核融合発電所の導入が予測される将来の電力系統の規模及び構成は現在のそれとは大きく異なると予測されている。加えて、核融合発電所（原型炉を含む）として提案されている発電所の規模も、設計案によって大きく異なる。従って本章では、幅広い構成の電力系統において核融合発電所の即時解列<sup>13</sup>を模擬することで将来電

---

<sup>13</sup> 核融合発電所における緊急停止はトカマク炉・ヘリカル炉の双方において様々な要因により引き起こされる可能性があるが、プラズマディスラプション以外の要因

力系統過渡安定度の定量的評価を実施し、核融合発電所の将来電力系統への受容性について検討することを目的とする。

この目的のため、本章ではまず既存の電力網ではなく、今後大きく特性が変化する先進国、およびこれから核融合発電所の導入が考えられる途上国の双方を可能な限り網羅するような電力系統につきその過渡安定度を評価できるモデルを構築する。その後、当該モデルを用いることで、将来電力系統の幅広い規模・構成について、前章で導かれたプラズマディスラプション発生時の核融合発電所運用シナリオに基づき、核融合発電所導入にかかる電力網過渡安定度という新たな制約にかかる定量的考察を実施する。

### 5.1.3 先行研究

#### 5.1.3.1 電力系統過渡安定度評価モデル

電力系統の過渡安定度の評価を目的としたシミュレーションモデルとしては既に複数の産業用途のソフトウェアが存在する。我が国においては1970年代以降、電力中央研究所が開発を続けてきた Y 法と呼ばれるシミュレーション手法が実務で使われ続けてきた[108]。Y 法は系統計算に Y 行列（即ちアドミタンス行列）を用いることで、電流や電圧が複素ベクトルの的に表現出来る領域において 0.1 秒程度から数十秒程度までの時間領域における電力系統安定度の動的解析を可能としたシミュレーション手法である[109]。Y 法の開発過程では電力会社の協力のもと、実際の電力系統における種々の試験との比較が実行され解析精度が検証されている。しかしながら一般に、こうした産業用途のソフトウェアは実地における適用を目的としているため精密であるものの柔軟性は低く、本研究が目的とする将来の幅広い電力系統について模擬をする用途には適さない。

一方で、より柔軟な模擬を行うことを目的として、簡易なモデルを構築する試みも存在する。Murakami ら(2006) [110]は風力発電所が電力系統過渡安定度を与える影響について評価するため、Heffron-Philips モデルを用いた電力系統周波数の評価モデルを構築している。Murakami らは構築されたモデルを用いた検討により、風

---

による緊急停止においては即時解列が必要であるのか、それとも数十秒間の発電継続が可能であるのかについて未だ明らかでない。この理由から、本論文においては、「プラズマディスラプションにかかる即時解列」に絞って議論をしている。

力発電によりもたらされる系統の不安定性を蓄電装置により平準化する有効性を示した。同様の試みは大屋(2008)[111]、入江(2009)[41]両氏の修士論文においても見られる。両氏の修士論文は Murakami ら(2006)の論文に示された評価モデルを発展させ、電力系統の安定性に風力発電が与える影響についてマイクログリッドやヒートポンプ給湯器といった将来電力系統における追加的な要素を考慮の上、再度論じたものである。

### 5.1.3.2 核融合プラントが電力系統に与える影響

核融合プラントの電力系統への影響に関しては、核融合プラズマの立ち上げ時におけるコイルの励磁並びにプラズマ加熱にかかる電力系統への影響について課題が認識されており、複数の研究が存在する。

高尾(2005) [112]は修士論文において、核融合炉を蓄電装置を用いない条件において立ち上げた場合に電力系統周波数に与える影響について Y 法を用いた基礎研究を実施している。結果は、ITER ライクの核融合炉立ち上げは、蓄電装置が無い場合には電力系統の構成によっては周波数に少なからざる影響があることを示唆した。また、Lampasi ら ENEA の研究者を中心としたチームは、トカマク炉の運用シナリオが現地の電力系統に適しているかを自動的に計算するソフトウェア”IPSE DIXIT”を開発中である。その進行状況においては 27th IEEE Symposium On Fusion Engineering において発表が為され、GUI で直感的に計算が出来るシステムが構築されつつあることが報告されている[113]。

しかしながら、本論文が着眼するプラズマディスラプションの発生時の電力系統への影響については課題が未だ汎く認識されておらず、従って先行研究についても本稿執筆時点において確認できなかった。

## 5.2 方法

### 5.2.1 電力系統過渡安定度評価モデル構築にかかる要求

5.1.3.1 節において述べた通り、既存の電力系統安定性評価ソフトウェアは精密な解析を目的としており、本論文が企図する仮想発電所の将来電力系統における安定性評価に用いるにあたっては柔軟性・拡張性に欠け、かつ演算時間が長いため、適

切でない。核融合発電所とそれが導入される将来の電力系統はその特性が明確になっておらず、将来の電力系統を模擬するにあたり、例えば配電系統の具体的な配列までを仮定することは、本質的な計算結果の精度向上に繋がるものではない。それよりも、より幅広い構成や容量の電力系統について多数のケースについて網羅的に模擬を行うことが、より本質的な知見に繋がると考えられる。

従って本研究においては、将来の幅広い電力系統を評価できる一般性と柔軟性、さらには演算時間の短さを満たす電力系統安定度評価手法が必要となる。そこで本章では、この研究上の必要を満たすため、以下に定める目標の柔軟性、拡張性、演算速度、および一定の正確性を満足する評価モデルを新たに構築することとした。

電力系統の過渡安定性評価にあたっては、電力系統周波数のみを安定性の指標として計算を実施することとする。これは将来の電力網において特に制限が厳しくなると予見されるのが周波数条件であるため、この簡易化により評価モデルの柔軟性並びに演算速度の向上を図る。演算時間については、1 計算(900 シミュレーション秒)あたり演算時間 10 秒以内を目標とする。

モデルの構築にあたっては、今後の拡張性を担保するため、汎用計算ソフトウェアである Matlab/Simulink 上において完結することとする。

正確性については、発電所の脱落を模擬したリファレンスシナリオについて、Y 法の結果との比較を実施することとし、最大周波数偏差について誤差 $\pm 3\%$ 以内を目標とする。

### 5.2.2 Heffron-Philips モデルに基づく電力系統過渡安定度評価モデルの構築

#### 5.2.2.1 電力系統過渡安定度評価モデルの概要

必要な要求を満たすため、電力系統周波数を迅速かつ精度良く模擬できる電力系統過渡安定度評価モデルを新たに構築する。本評価モデルでは、発電源として火力発電所、水力発電所、原子力発電所、再生可能エネルギーを構成要素として含む電力系統を模擬し、そこに核融合発電所の出力変動による擾乱を加えることを想定する。本評価モデルの概念図を Figure 5-1 に示す。

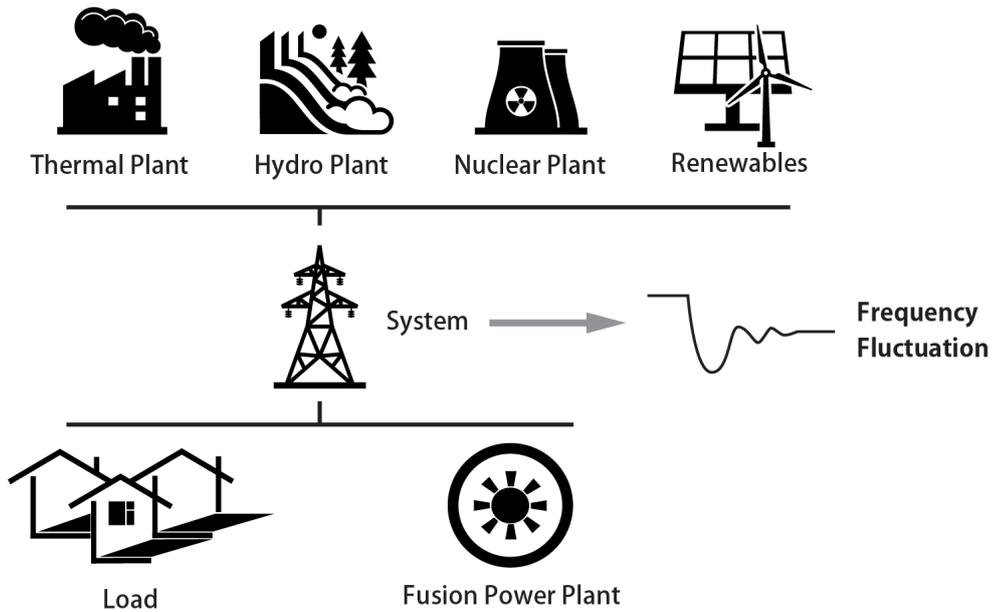


Figure 5-1 Illustration of the Power System Model.

開発環境は Figure 5-2 に示す Matlab Version 9.2 / Simulink Version 8.9 を用い、1.3GHz デュアルコア Intel Core i5 / 4GB 1,600MHz LPDDR3 メモリを搭載した MacBook Air (11-inch, Mid-2015) 上においてシミュレーションを実行した。ソルバは固定ステップ・ルンゲクッタ法 (ode4) を用い、基本サンプルタイムは 0.01 sec とした。

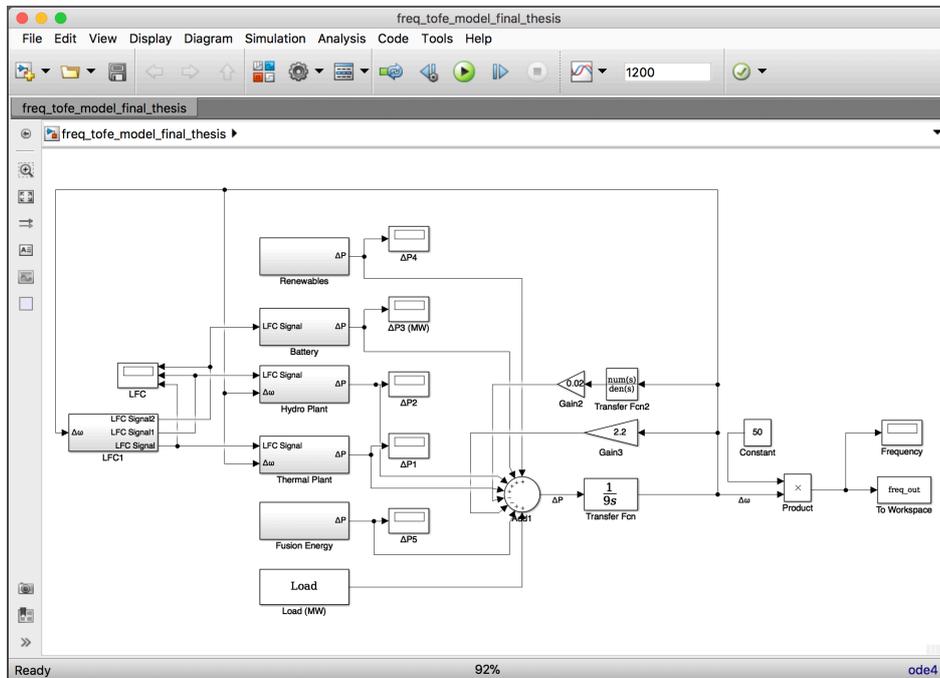


Figure 5-2 A Screenshot of Matlab/Simulink Modeling and Simulation Environment.

5.2.2.2 Heffron-Philips モデル

Heffron-Philips モデルとは、一機無限大母線系統に接続された同期発電機の挙動について、制動巻線の影響を減衰定数に含め、電機子巻線抵抗についても無視するなど単純化を行うことで、同期発電機の周波数挙動を計算するモデルである[114]。本モデルは簡易ながら、擾乱に対する電力系統の応答について良い近似を与えることが知られている[115]。また、多機系統への応用についても多くの研究がなされており、その有用性が知られている[116]。このことから Heffron-Philips モデルは、本論文が目的とする一般性と柔軟性、さらには演算時間の短さを一定の精度を満たしながら実現する評価モデルの構築に適していると考えられる。

従って本論文においては、Murakami ら(2006)[110]が発表したモデルを参考とすることで、Eq. 5-1, 5-2 に示す通り Heffron-Philips モデルを構築した。

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \tag{Eq. 5-1}$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} (\Delta P - K \Delta \delta - D \Delta \omega) \tag{Eq. 5-2}$$

ここで $\Delta \omega$  [rad/s],  $\Delta \delta$  [rad]はそれぞれ周波数偏差、位相角偏差を表し、 $\Delta P$  は電氣的・物理的パワー変化を表す。また、 $M$  は系統慣性、 $D$  は減衰定数を表している。

Eq. 5-1, 5-2 にもとづき構築されたブロック線図を Figure 5-3 に示すとともに、Table 5-1 にモデルの各種パラメータを示す。ここで、 $\Delta P$  の入力信号については規格化を実施することで、規模が異なる電力系統についても計算が実施できるようにし、柔軟性を高めている。

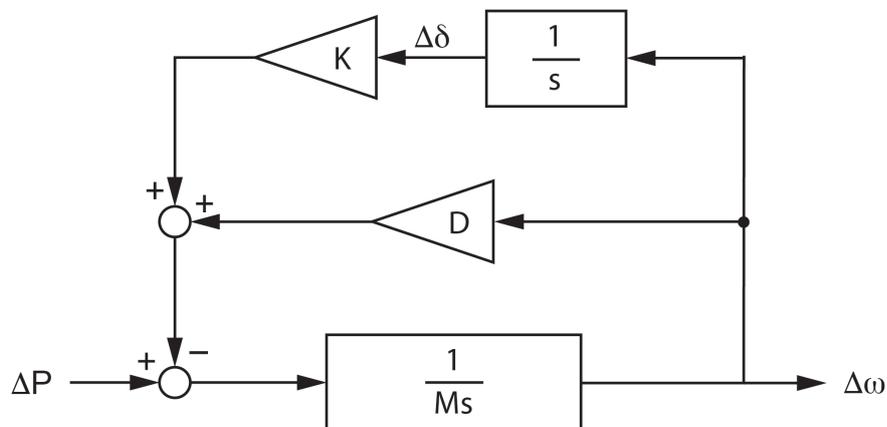


Figure 5-3 Block Diagram of the Heffron-Philips Model [31].

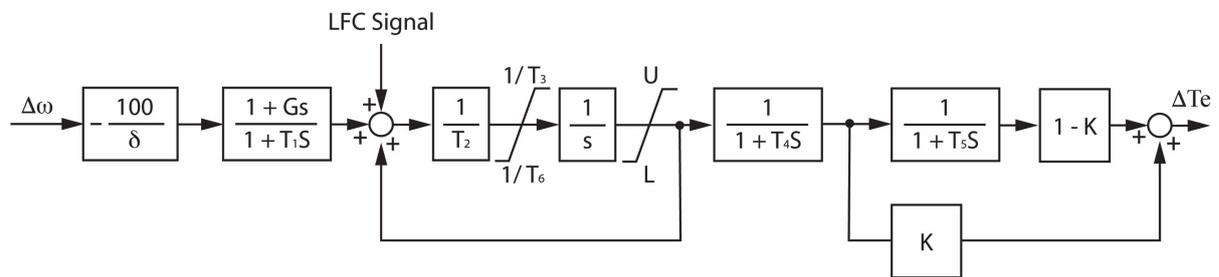
Table 5-1 Parameters of the Heffron-Philips Model.

Parameter	Value
Utility Frequency	50 Hz
System Inertia, M	9.0
Damping Constant, D	2.2
Influence of Torque Angle, K	0.02

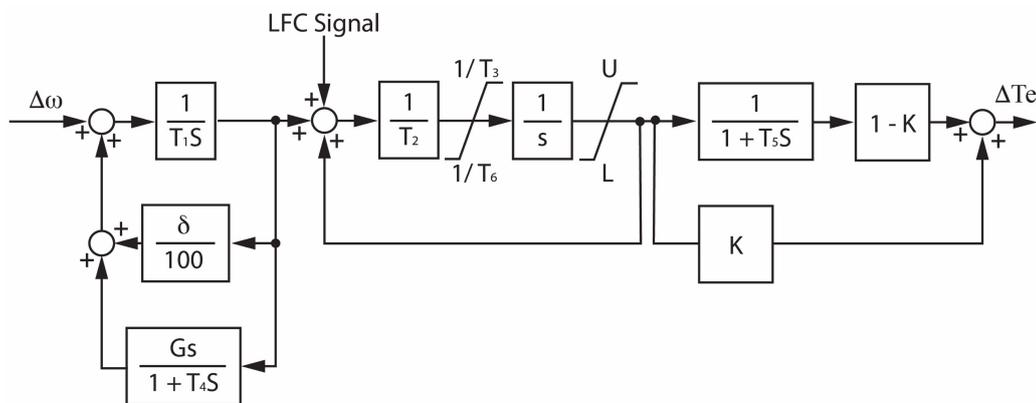
5.2.2.3 各種発電源モデル

5.2.2.3.1 水力発電所、火力発電所

Heffron-Philips モデルを用いた先行研究の多くでは、各種発電源について、単純化されたモデルを用いている。しかしながら、筆者による評価モデルにおいては、Heffron-Philips モデルに組み込む水力発電所、火力発電所モデルとして、Figure 5-4 並びに Table 5-2 に示す電中研 Y 法のガバナブロック線図モデル[112]を採用した。業界において長く用いられている同法のモデルを組み込むことで、より実際の発電源の振る舞いに近いシミュレーションを実施することを目的としている。



(a) Hydro Power Plant



(b) Thermal Power Plant

Figure 5-4 Block Diagram of the Power Plant Models [112].

Table 5-2 Parameters of the Power Plant Models [112].

Thermal Plant Parameters			Hydro Plant Parameters	
$\delta$	Governor rate [%]	4.0	Rigid recovery rate [%]	4.0
K	High-pressure power share [p.u.]	0.3	Pipe pressure simulation [-]	-2.0
T <sub>1</sub>	Speed relay time constant [sec]	0.2	Supplementary Servo time constant [sec]	4.0
T <sub>2</sub>	CV servo time constant [sec]	0.2	Main servo time constant [sec]	7.0
T <sub>3</sub>	CV servo opening time [sec]	5.0	Main servo opening time [sec]	10.0
T <sub>4</sub>	High-pressure turbine time constant [sec]	0.25	Elastic restoring time constant [sec]	12.0
T <sub>5</sub>	Low-pressure turbine time constant [sec]	9.0	Water pipe time constant [sec]	1.5
T <sub>6</sub>	CV servo closing time [sec]	-0.001	Main servo closing time [p.u.]	-0.001
U	CV servo upper limit [p.u.]	1.05	Main servo upper limit [p.u.]	1.02
L	CV servo lower limit [p.u.]	0.0	Main servo lower limit [p.u.]	0.0
G	Speed relay lead time constant [sec]	0.0	Elastic restoring gain [-]	0.6
M	Generator inertia constant [sec]	8.0	Generator inertia constant [sec]	10.0

#### 5.2.2.3.2 原子力発電所

本評価モデルでは対象電力系統における原子力発電所の運用はロードリミット運転と仮定し、シミュレーション期間における電気出力変動は無いものとして計算を実施した<sup>14</sup>。

<sup>14</sup> この点から、本評価モデルにおいては、原子力発電所容量に地熱発電・小水力発電等のロードリミット電源が全て含まれていると解釈することができる。

5.2.2.3.3 再生可能エネルギー（太陽光・風力）

将来の電力系統における最も大きな不安定要因の一つが、太陽光・風力発電を含む再生可能エネルギーの短期的な出力予期不能性並びに負荷への不追従性である。特に太陽光・風力発電所の予期せぬ短期的な出力変動は、電力系統の瞬動予備力を減少させ、これにより電力系統の過渡安定性に大きな悪影響を与える。これは太陽光・風力発電所において10分程度の短い時定数をもって起きる出力減少は、予備電源立ち上げでの補完が難しく、瞬動予備力の減少に直結するためである。

従って本研究においては、再生可能エネルギーとして、エネルギー貯蔵装置を持たない太陽光・風力発電所を模擬したモデルを新たに Heffron-Philips モデルに組み込んだ<sup>15</sup>。再生可能エネルギーモデルは負荷に対して不追従とし、太陽光・風力発電所の10分間における出力変動については、気象庁提供の AMeDAS の過去5年間の統計データを基に推計を実施した[117]。推計手法は以下の通りである。

太陽光・風力発電の出力変動について推計を行う際に重要となるのは立地である。本研究においては、研究に必要なデータが公開されており、かつ将来の核融合発電所の導入も見込まれる電力系統として日本国を選び、その太陽光・風力発電の出力変動を代表例として計算した。推計に利用する風力発電所の立地の選定にあたっては NEDO(2014)の資料[118]に基づき、2014年時点において20 MW以上の定格容量を持つ大規模風力発電所を全て推計に組み込んだ<sup>16</sup>。推計に利用する太陽光発電所の立地の選定にあたっては、NEDO(2013)の調査[119]に基づき、一般にメガソーラーと呼称される大規模太陽光発電所と、都市部における分散型太陽光発電の双方を推計に組み込んだ。発電容量は IEA(2016)[6]を参考に大規模太陽光発電所30%、分散型太陽光発電所70%と仮定した。それぞれのサイズは大規模太陽光発電所5 km × 5 km、分散型太陽光発電所15 km × 15 km と見なし、推計を実施した<sup>17</sup>。太陽光

<sup>15</sup> 太陽光・風力は2040年においても再生可能エネルギー(水力・バイオ燃料・地熱除く)の92%を占めると予測されており、太陽光・風力のみを模擬するのは将来の電力系統においても十分妥当な仮定である。6. IEA, *World Energy Outlook 2016*. 2016, Paris: OECD.

<sup>16</sup> 風力資源が豊富である陸上の地点は日本国においては2016年時点で既に開発がほぼ終わっているとさるため、洋上風力が推計に組み込めないことを除き、この仮定は将来における風力発電の立地の仮定としても適切であると考えられる。

<sup>17</sup> 感度分析により、これらの仮定については結果に大きな影響を与えないことが確認された。大規模太陽光発電所と分散型太陽光の割合を50%変化させた場合でも、太陽光の出力変動の推計値の変化は2.5%に留まった。

パネルは  $30^\circ$  の角度をもって設置され、向きは真南であると仮定された[120]。推計に組み込まれた太陽光並びに風力発電所の立地一覧を Figure 5-5 に示す。

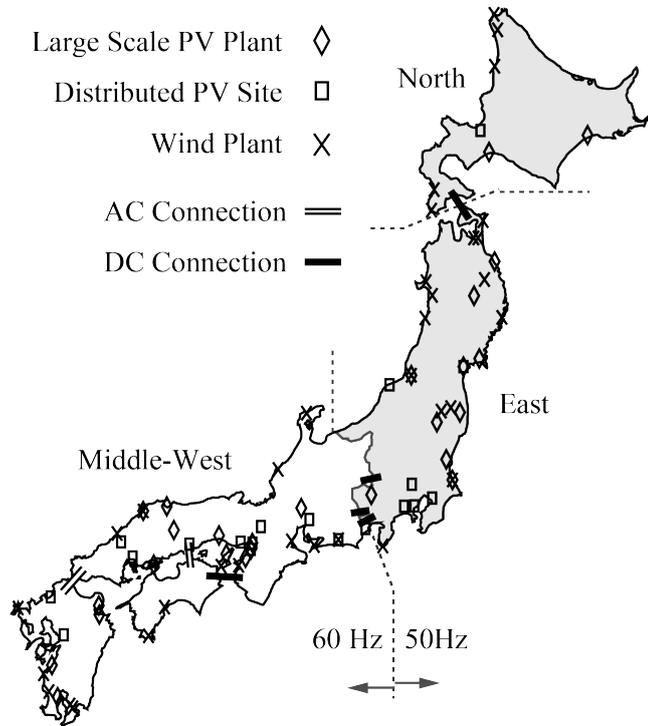


Figure 5-5 Assumed Location Sites of Renewable Power Sources.

風力発電所における発電量については、日本国においても汎く用いられている Vestas 社のタービン VESTAS V90 2.0 MW の実機カタログデータ[121]を3次関数でモデル化し、AMeDAS における 10 分間風量データを発電量に変換した。推計に用いた風速—発電量の関数を実線で、実機データを点線で Figure 5-6 に示す。カットオフ風力は 21 m/s としている。

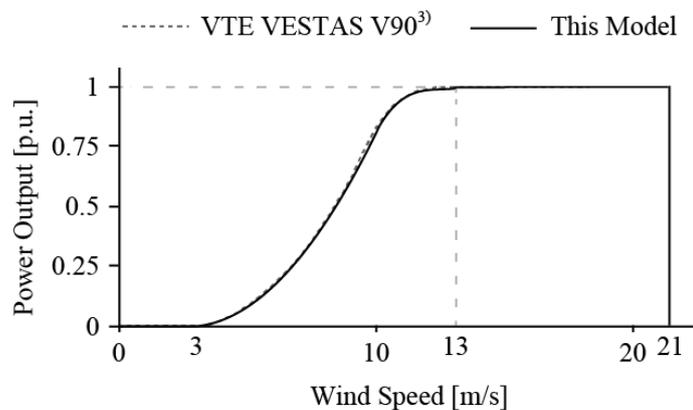


Figure 5-6 Wind Turbine Model (VTE Vestas V90 2.0MW) [121].

太陽光発電所における発電量については、以下の手法を用いて AMeDAS における 10 分間日射時間データを発電量に変換した。始めに Yoshimitsu ら(2009)の手法 [122]を応用し<sup>18</sup>、Figure 5-7 の手法にて 10 分間日射時間から全天日射量を推計した。その後、Erbs モデル[123]を適用することで、全天日射量を地表での 30°傾斜角における日射量へと変換した。最後に、地表での傾斜日射量を JIS C 8907 [124]に則り発電量に変換した。

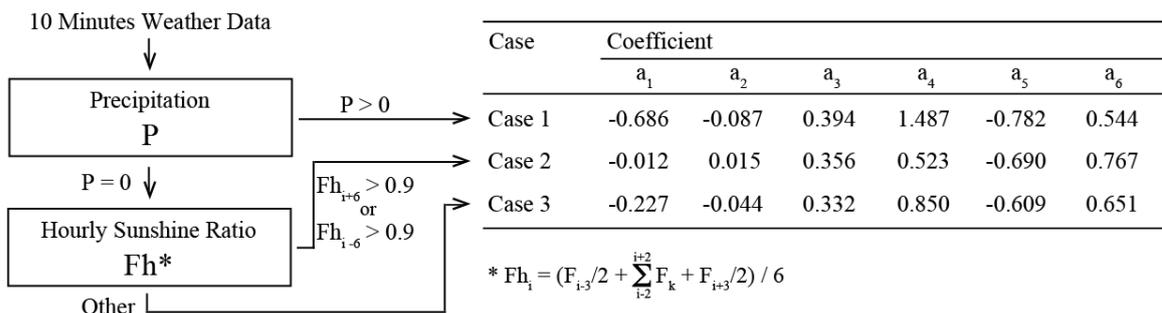


Figure 5-7 Solar Radiation Estimation Method (Modified by the Author, Presented by Yoshimitsu et al. [122]).

上記の手法により推計された、10 分間における太陽光並びに風力発電所における発電出力の変位は Figure 5-8 の通りである。10 分間における太陽光発電所における発電量の変位の標準偏差は 0.0178 p.u.、風力発電所の変位の標準偏差は 0.0083 p.u.であった。

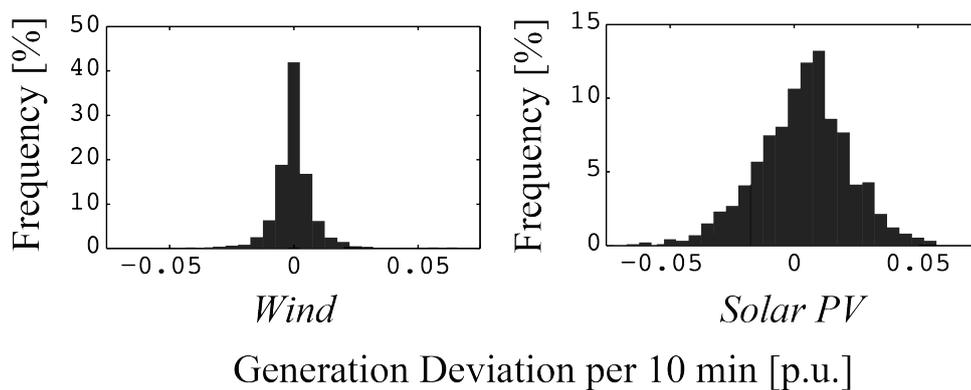


Figure 5-8 Generation Characteristics of Solar and Wind [34].

<sup>18</sup> Yoshimitsu ら(2009)の手法は 60 分間日射時間から全天日射量を推計するものであるが、筆者はこの手法を応用し Figure 10 の通り 10 分間日射時間に適用した場合でも 3-10 %の誤差で全天日射量を推計できることを確認した。

### 5.2.2.4 LFC システム

本章にて構築する評価モデルでは 900 秒間程度のシミュレーションを実施するため、周波数制御として 2.3.2.3 節に示す通り各発電所のガバナフリー運転(GF)に加え負荷周波数制御(LFC)についても模擬する必要がある。LFC モデルについて、先行研究では単純化されたモデルが用いられているが、本評価モデルでは実際の LFC 制御器[40]を参考に構築した Figure 5-9 に示すモデルを用いることで、より実際の電力系統の振る舞いに近い評価を実施する。ここで Figure 5-9 においては、出力増減信号の 2/3 を火力発電所に、残りの 1/3 を水力発電所に対して出力することを示している。

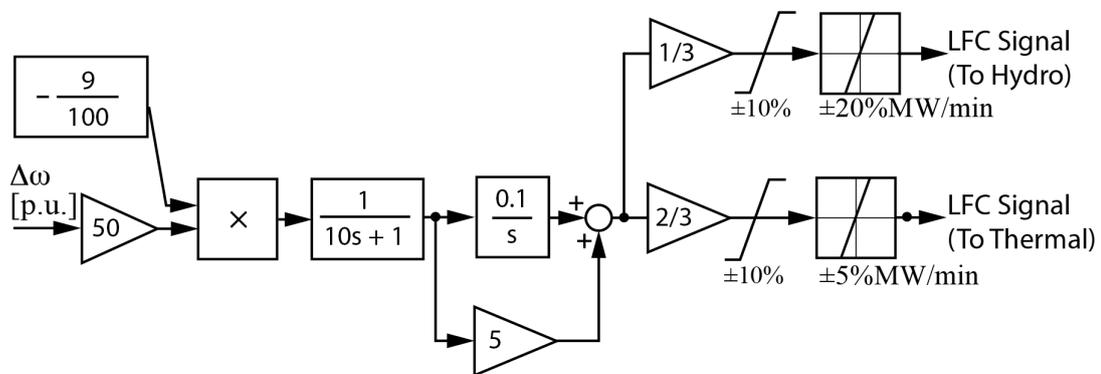


Figure 5-9 Block Diagram of the LFC Model [31].

### 5.2.2.5 核融合発電所

第 4 章における検討は、プラズマディスラプション発生時、核融合発電所は電力系統から即時解列される必要があることを示唆した。従って、本評価モデルにおいては、核融合発電所はプラズマディスラプション発生時にステップ状の出力減少を起こす信号ブロックとして模擬し、発電端出力は第 4 章の核融合発電所モデルの通り 1,200 MW とした。

### 5.2.2.6 配送電システム

配送電についてはそのロスを考慮せず、Figure 5-10 に示すブロック線図として電力系統モデルを構築した。ここで、電力系統の負荷変動については、我が国の電力会社の夏季における 10 分間変動標準偏差の実測値において深夜帯(2 時～5 時)で 21.10 MW、立ち上がり時間帯(7 時～10 時)で 19.61 MW、昼間帯(14 時～17

時) で 13.04 MW と分析されており [40]、本シミュレーションが考慮する時間帯においては系統容量に比して十分小さいと判断された。従ってシミュレーション時間中においては負荷変動を無視するものとし、モデル化を行わなかった。

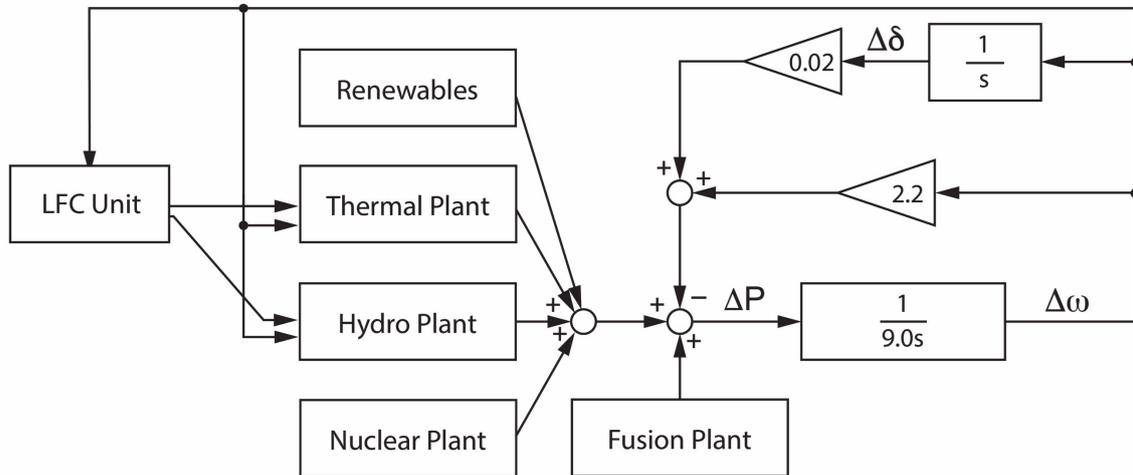


Figure 5-10 Block Diagram of the Power System Model [31].

### 5.2.3 電中研 Y 法との比較による評価モデル妥当性の検証

構築された電力系統過渡安定度評価モデルが、5.2.1 節において定めた目標を満たすかどうかにつき、電中研 Y 法とリファレンスシナリオの評価結果について比較することで、検証を実施した。

リファレンスシナリオについては、Figure 5-11 に示す電力系統中の核融合発電所において、Figure 5-12 に示す通り発電機の解列を想定した次のようなステップ状の出力減少を設定した。電力系統の構成については、Table 5.3 に示す通り 12GW と 56GW の 2 つのサイズを想定し、評価を実施した。

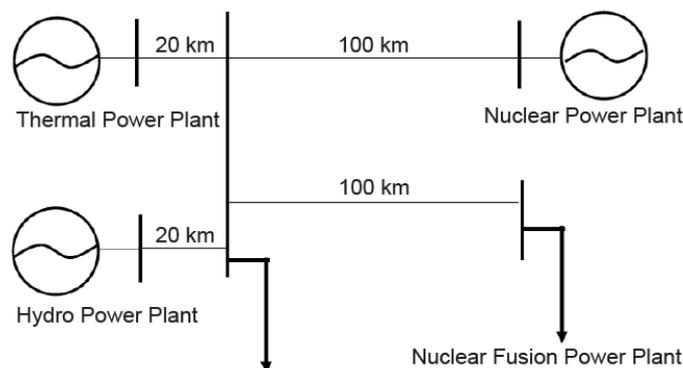


Figure 5-11 Reference Grid Configuration [112].

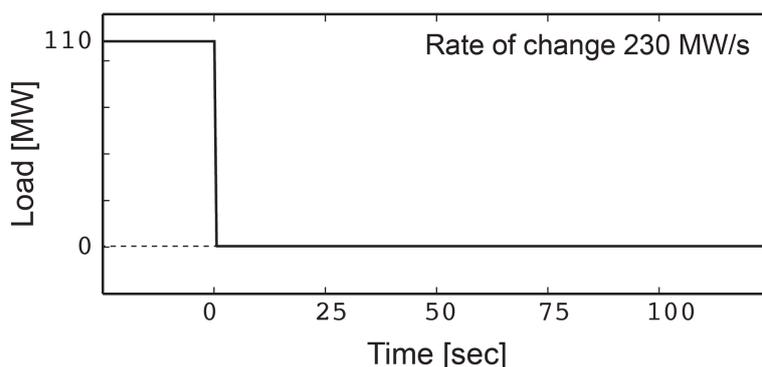


Figure 5-12 Load Pattern of the Reference Scenario.

Table 5-3 Power System Configuration of two Reference Scenarios.

Scenario	Thermal	Hydro	Nuclear
12 GW Scenario	7.1 GW	1.7 GW	3.32 GW
56 GW Scenario	32.4 GW	7.8 GW	12.6 GW

この2つのリファレンスシナリオについて、電中研 Y 法並びに筆者により構築された電力系統過渡安定度評価モデルのそれぞれによって評価された結果について、Figure 5-13 に示す。Figure 5-13 は横軸に時間を、縦軸に電力系統周波数を示しており、リファレンスシナリオにおいて、一度は落ち込んだ電力系統周波数が 20~30 秒程度かけ回復している様子が示されている。

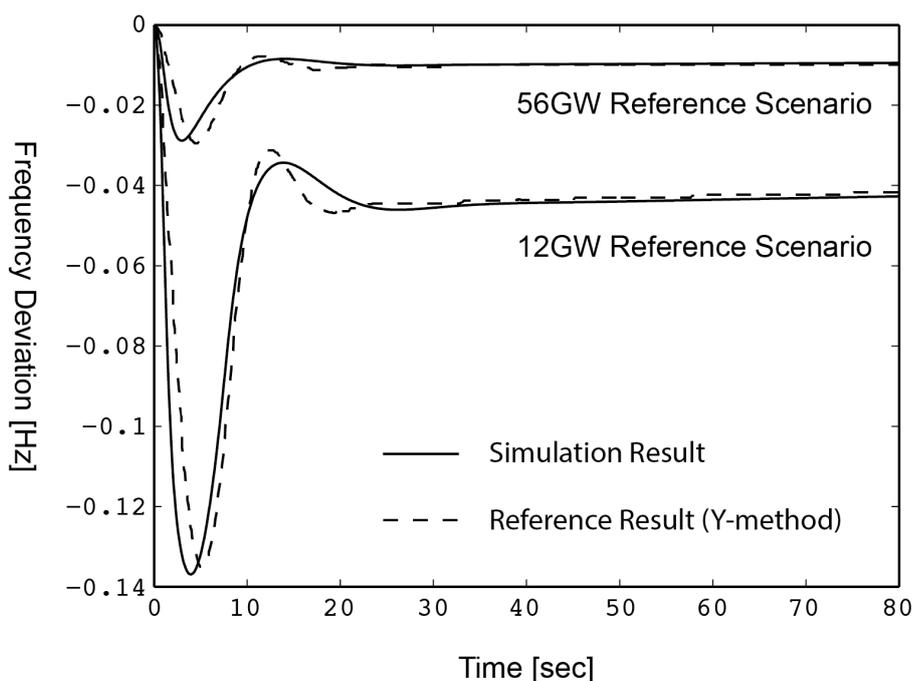


Figure 5-13 Comparison of Reference Scenario Results [31, 112].

評価結果は構築された電力系統過渡安定度評価モデルと電中研 Y 法との間で良い一致を示した。結果の差異は、56GW シナリオで-2.9%、12GW で+1.4%であった。これは、目標としていた 3%以内の差異という条件を満たすものである。

かつ、本電力系統過渡安定度評価モデルは 1 計算(900 シミュレーション秒)あたり演算時間が 3 秒程度であった。これは、目標としていた 1 計算 10 秒以内の演算時間という目標を満たすものである。

また、本評価モデルは全て Matlab/Simulink 上において構築されており、産業用ソフトウェアと比して拡張性・柔軟性並びにアクセシビリティにおいても優れていると言える。

以上より、本モデルは、5.2.1 節において定めた要求を満たすものと判断でき、核融合発電所の電力網過渡安定性に与える影響に関する評価に供するものと評価される。

## 5.3 結果

### 5.3.1 電力系統容量並びに構成

本研究の目的は、電力系統過渡安定度評価モデルを用いることで、将来の幅広い電力系統において、核融合発電所においてプラズマディスラプションが発生した際の電力系統過渡安定度への影響を評価することである。

そこで、将来の幅広い電力系統構成を包括した評価を実施するため、Table 5-4 に示す電力系統構成、計 924,000 ケースについて計算を実施した。本表において示される容量並びに構成は、核融合発電所を除いた電力系統の容量並びに構成である。

Table 5-4 Simulated Power System Compositions [34].

System Parameter	Range	Step
Fusion Power Plant Electrical Output, $P_{out}$	300 – 1,500 MW	300 MW
Grid Size, $S_{grid}$	5 – 120 GW	5 GW
Fraction of Thermal Generation, $F_{thermal}$	0 – 100%	5%
Fraction of Hydro Generation, $F_{hydro}$	0 – 100%	5%
Fraction of Nuclear Generation, $F_{nuclear}$	0 – 100%	5%
Fraction of Renewable Generation, $F_{renewable}$	0 – 100%	5%
Renewable Output Fluctuation in the Last 10 min	$+2\sigma - -2\sigma$	$\sigma$

5.3.2 代表的条件下における電力系統周波数挙動

プラズマディスラプション発生時における電力系統の一般的な挙動について解説するため、代表的な事例として、924,000 ケース中、2040 年におけるピーク時間帯の東日本電力系統（東北電力+東京電力系統）を模した Table 5-5 のケース[125]を取り上げる。Table 5-5 のケースにおけるプラズマディスラプション発生時の電力系統の挙動は Figure 5-14 に示される通りである。Figure 5-14 は Figure 5-13 と同様に横軸に時間を、縦軸に電力系統周波数を示したものである。

Table 5-5 “Japan East System 2040”: Predicted East Japan Power System Composition in 2040 [73].

System Parameter	Value
Fusion Power Plant Electrical Output, $P_{out}$	1,200 MW
Grid Size, $S_{grid}$	75 GW
Fraction of Thermal Generation, $F_{thermal}$	30%
Fraction of Hydro Generation, $F_{hydro}$	20%
Fraction of Nuclear Generation, $F_{nuclear}$	20%
Fraction of Renewable Generation, $F_{renewable}$	30%
Renewable Output Fluctuation in the Last 10 min	$-\sigma$

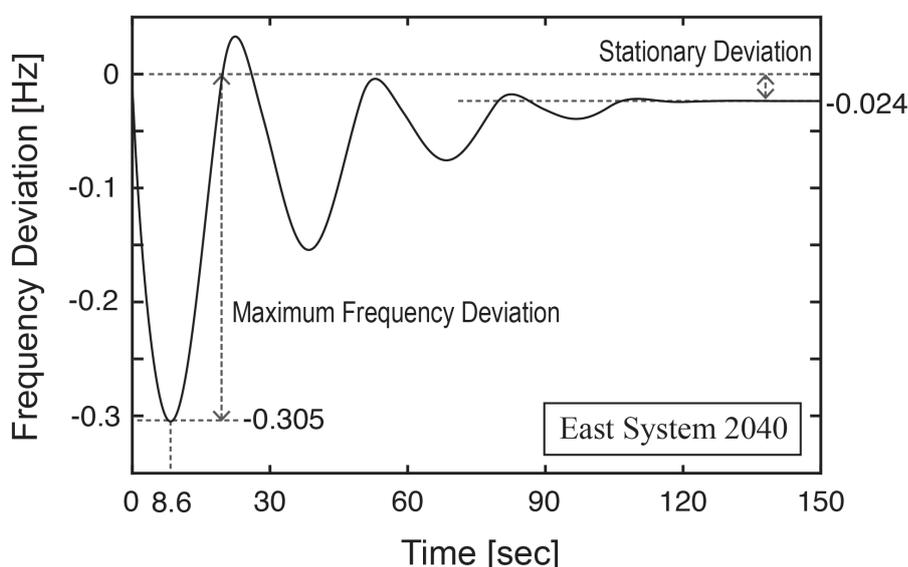


Figure 5-14 Utility Frequency Behavior of Japan East System 2040 Case.

Figure 5-14 はプラズマディスラプション発生時、一般に電力系統周波数は 5~10 秒程度かけ大きく落ち込む挙動を示すことを示している。Table 5.4 の電力系統ケー

スにおいては、最大周波数偏差はプラズマディスラプション後 8.6 秒に観察される -0.305 Hz であることが読み取れる。

その後、火力発電所並びに水力発電所において、はじめにガバナフリー運転により、次に LFC 運転により発電出力が上昇することで、電力系統周波数は数十秒をかけ回復する。最終的に、電力系統周波数は 120 秒程度前後で定常偏差へと収束し、以降は定常偏差解消のためバックアップ電源の立ち上げを待つこととなる<sup>19</sup>。Table 5.4 の電力系統ケースにおける定常偏差は -0.024 Hz である。

### 5.3.3 再生可能エネルギーの導入下における電力系統周波数挙動

プラズマディスラプション発生時の電力系統周波数の逸脱は、再生可能エネルギーの導入が進んだ電力系統ほど大きかった。核融合発電所出力 1,200 MW、電力系統容量 90 GW における条件下で、再生可能エネルギーの導入割合を 0%、10%、20%と変化させた場合の電力系統周波数の挙動を Figure 5-15 に示す。Figure 5-15 は横軸にプラズマディスラプション発生後の時間を、縦軸に電力系統周波数を示している。

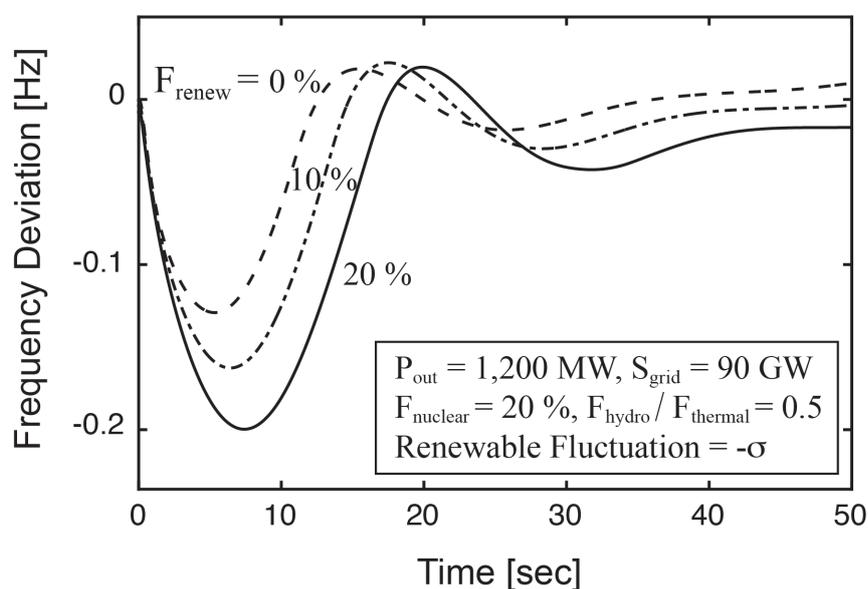


Figure 5-15 Utility Frequency Behavior under the Effect of Renewable Power Sources [34].

<sup>19</sup>本評価モデルはプラズマディスラプション発生後最大 900 秒の模擬を目的としており、バックアップ電源の立ち上げは考慮されていない。

Figure 5-15 は電力系統への再生可能エネルギーの導入が進むに従い、プラズマディスラプション時の電力系統への影響が拡大することを示している。再生可能エネルギーの発電割合が0%である場合、核融合発電所においてプラズマディスラプションが発生をした場合でも電力系統周波数の逸脱は 0.13 Hz 程度であった。一方で、再生可能エネルギーが 20%の発電を担う電力系統においては、最大周波数偏差は 0.2 Hz まで増大している。これは、再生可能エネルギーには負荷追従性がないために、発電割合が高い電力系統は突然の負荷変動に対する対応性が低下する（瞬動予備力が低下する）ためである。

さらに、プラズマディスラプション発生前 10 分間における再生可能エネルギーの予期せぬ出力変動も、周波数の挙動に影響を与えた。Table 5-5 における電力系統構成について、プラズマディスラプション発生前 10 分間における再生可能エネルギーの予期せぬ出力変動について、 $+2\sigma \sim -2\sigma$  の範囲で感度分析を実施した結果を Figure 5-16 に示す。Figure 5-16 は横軸にプラズマディスラプション発生後の時間を、縦軸に電力系統周波数を示している。

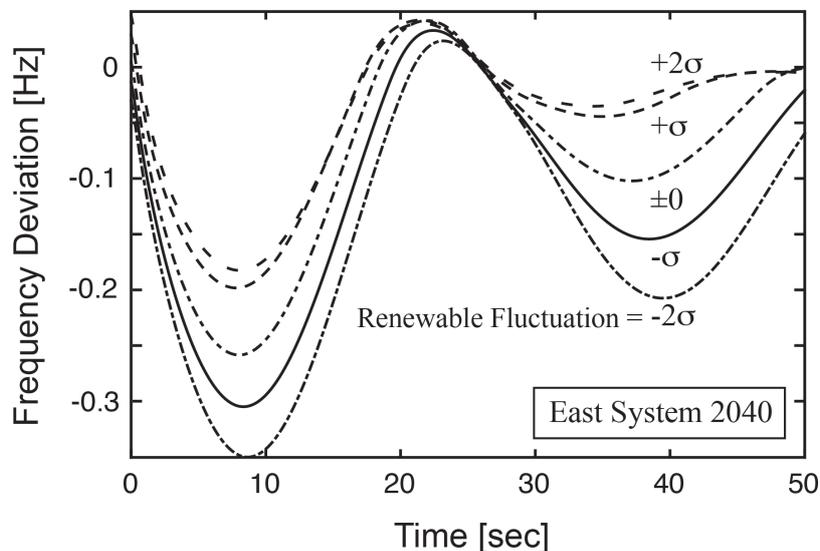


Figure 5-16 Utility Frequency Behavior under the Effect of Renewable Generation Fluctuation in the Last 10 Minutes.

Figure 5-16 は 10 分以内の予期せぬ再生可能エネルギーの出力変動が瞬動予備力に直接的な影響があり、電力系統周波数の挙動に影響を与えることを示している。再生可能エネルギーの出力が過去 10 分間に予期せず減少していた場合、減少分だけ瞬動予備力が奪われているために、プラズマディスラプション発生時の最大周波数

偏差もより大きくなった。予期せぬ変動が無い場合、最大周波数偏差は 0.19 Hz であったが、 $2\sigma$ 分の減少が発生していた場合、最大周波数偏差は 0.35 Hz まで増幅された。これは、10 分以内の予期せぬ再生可能エネルギーの負荷変動は他の負荷追従電源の出力増減による対応せねばならず、従って特に再生可能エネルギーの出力が減少した場合には瞬動予備力が減少するためである。

#### 5.3.4 原子力発電所の導入下における電力系統周波数挙動

原子力発電所はロードリミット運転を仮定しているためにプラズマディスラプション発生時においても発電出力が増減せず、従って電力系統周波数の復帰に寄与しない。従って原子力発電所の発電割合が大きい電力系統ほど、プラズマディスラプション発生時の電力系統周波数の逸脱が大きくなった。核融合発電所出力 1,200 MW、電力系統容量 90 GW における条件下で、原子力発電所の発電割合を 0%、20%、40%、60%と変化させた場合の電力系統周波数の挙動を Figure 5-17 に示す。Figure 5-17 は横軸にプラズマディスラプション発生後の時間を、縦軸に電力系統周波数を示している。

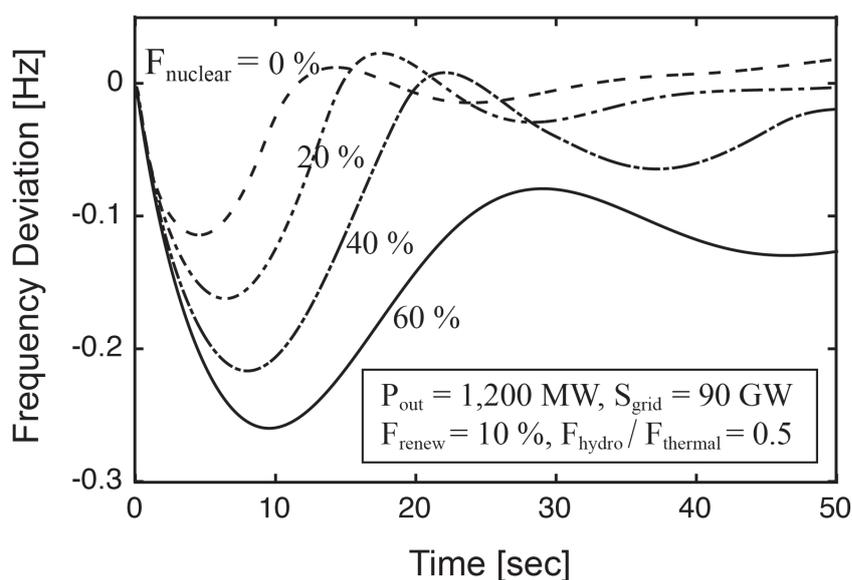


Figure 5-17 Utility Frequency Behavior under the Effect of Nuclear Power Plant [34].

Figure 5-17 は、再生可能エネルギーと同様、原子力発電所においても、発電割合の増加が瞬動予備力の制限に繋がり、電力系統周波数の偏差が拡大することを示し

ている。これは、原子力発電所もロードリミット運転時には負荷追従性を持たないためであり、発電割合が40%を超えた系統においては0.2 Hzを超えた周波数変動が観察されている。

### 5.3.5 再生可能エネルギー並びに原子力発電所の導入下における電力系統過渡安定度への影響

5.3.3 節、5.3.4 節において示された再生可能エネルギー並びに原子力発電所の導入下における電力系統過渡安定度への影響を包括的に理解するため、幅広い範囲の電力系統構成についてプラズマディスラプション時の周波数偏差を概観する。電力系統過渡安定度への影響としては最大周波数偏差を指標として用いることとする。そこで、x 軸に原子力発電の発電割合、y 軸に再生可能エネルギーの発電割合、z 軸に最大周波数偏差を示したものが Figure 5-18 である。Figure 5-18 は 90 GW 容量の系統において即時解列が発生した際の最大周波数偏差についてプロットしたものであり、(a)は核融合発電所出力 900 MW、(b)は核融合発電所出力 1,200 MW の結果を表している。Figure 5-18 において曲面の位置が高いほど、即時解列の悪影響が大きいことを示している。

Figure 5-18 には、再生可能エネルギー並びに原子力発電の割合が高い領域ほど、最大周波数偏差が大きくなる様子が示されている。これはこれら電源の割合が大きい電力系統であるほど、瞬動予備力が制限され、プラズマディスラプション発生時の電力系統過渡安定度への悪影響が大きいことを示している。さらに、Figure 5-18 (b)に示される最大偏差は全領域として(a)で示される最大偏差より大きくなっていることから、核融合発電所の出力が大きくなると、電力系統過渡安定度への影響が大きくなることも読み取れる。

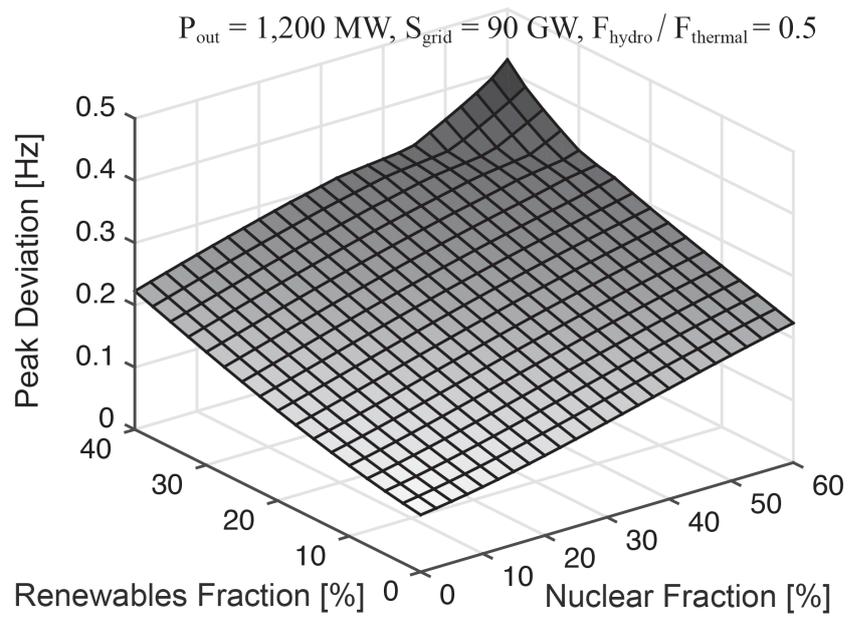
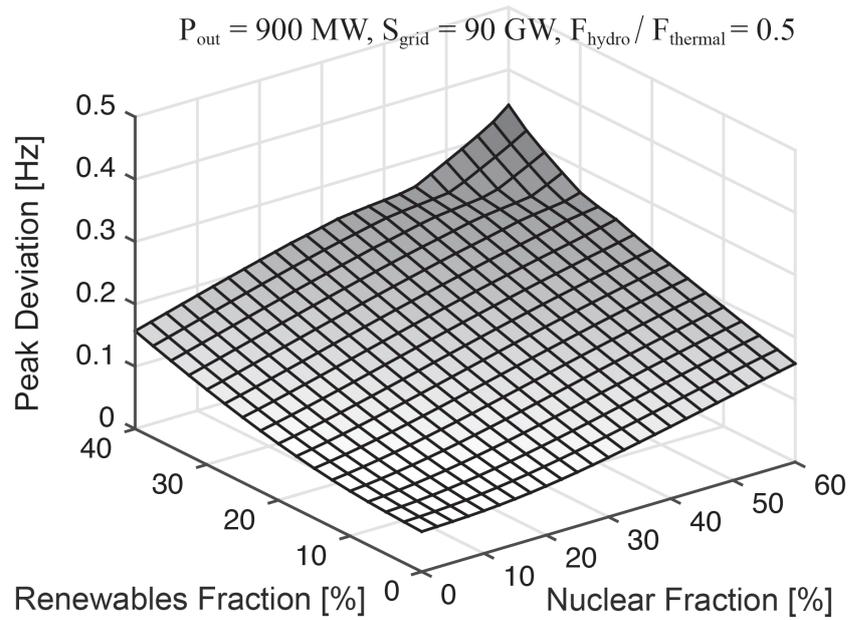


Figure 5-18 Peak Frequency Deviation under the Effect of Renewable and Nuclear Power Sources; Comparison of Fusion Plant Output [34].

電力系統の容量の大きさが過渡安定度に与える影響について概観するため、同様に最大周波数偏差を示したグラフを、電力系統容量 45 GW の場合と 90 GW の場合について比較したものが Figure 5-19 である。

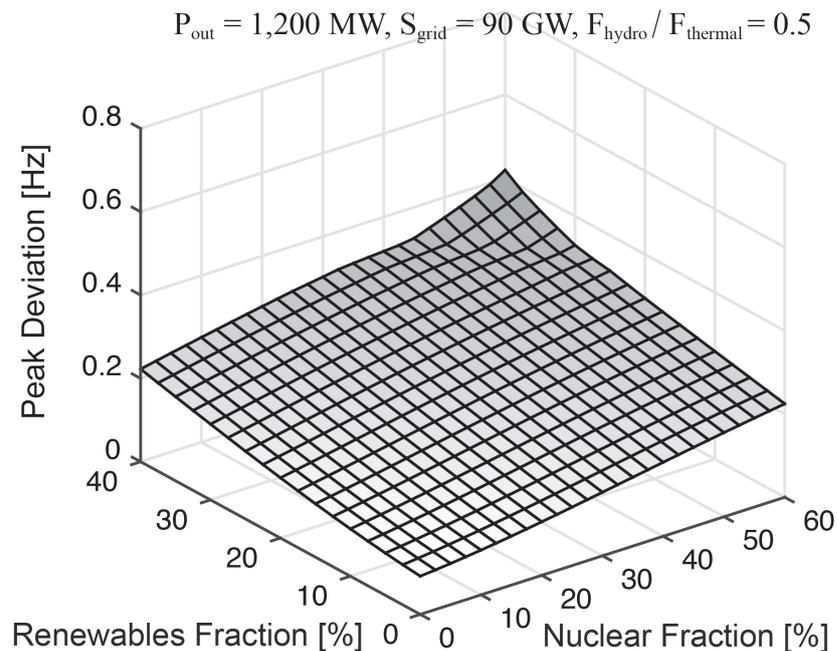
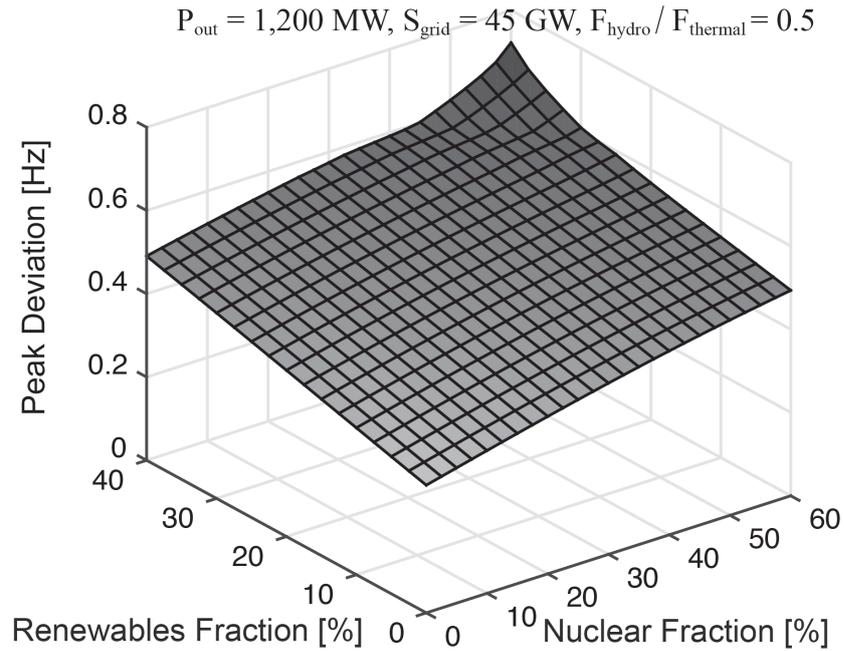


Figure 5-19 Peak Frequency Deviation under the Effect of Renewable and Nuclear Power Sources; Comparison of Grid Size.

Figure 5-19 においても同様に、再生可能エネルギー並びに原子力発電所の発電割合が大きくなるにつれ、プラズマディスラプション発生時の電力系統過渡安定度への悪影響が大きくなることが示されている。加えて、系統容量が(a) 45 GW から(b)

90 GW へと増加すると、周波数の最大偏差が大きくなり下がっていることが比較により示されており、電力系統容量が小さい系統においては、即時解列の悪影響も大きくなることが読み取れる。本結果の定量的考察について、次節において実施する。

### 5.4 考察

#### 5.4.1 電力系統過渡安定度にかかる核融合発電所の導入制約

核融合発電所は、特にその初期においては、一定の頻度でプラズマディスラプションが避けられないと考えられており、我が国においてはその原型炉での発生頻度を「0.5回/年」以下とすることが数値目標として示されている[50]。しかしながら、もし核融合発電所の緊急停止にかかる電力系統への影響が従来想定されていたものよりも大きかった場合、0.5回/年の頻度で緊急停止を起こす核融合発電所を、現地の電力系統が受け入れない可能性が存在する。

以上より、核融合発電所には即時解列に際する電力系統過渡安定度にかかる導入制限が存在すると考えることができ、これについて考察を行うことが、将来の核融合発電所導入戦略を論じる上で極めて重要であると考えられる。

2.3.2.2 節における調査は、許容できる周波数の最大偏差として 0.2 Hz が一つの基準となっていることを示している。従って、本論文では「プラズマディスラプション発生時においても周波数逸脱が 0.2 Hz を超えないこと」が、電力系統安定性から見た核融合発電所の受容性を満たす条件であると仮定し、この観点から 5.3.5 節の結果について考察を加える。

Figure 5-18 を参照すると、一定の領域について、明らかに 0.2 Hz よりも大きな最大周波数偏差が示されている。そこで、Figure 5-18 (a), (b) の 2 つの曲面について、0.2 Hz の高さで等高線を引き、それを二次元グラフ上に描画したものを Figure 5-20 に示す。Figure 5-20 において等高線の右上で示された領域が 0.2 Hz よりも最大周波数偏差が大きい領域であり、即ち容量 90 GW の電力系統において発電所の建設が制限される領域である。

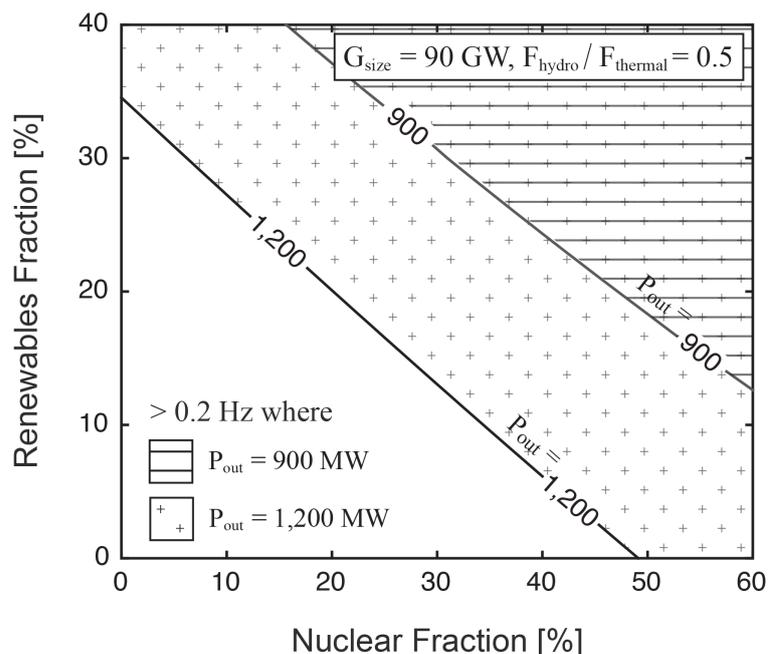


Figure 5-20 Indicated Limitation of Fusion Plant Installation for a 90 GW Grid [34].

Figure 5-20 は再生可能エネルギー及び原子力発電の発電割合が高い電力系統においては核融合発電所の即時解列による周波数偏差が 0.2 Hz を超越し、本研究が仮定する受容性の条件を満たさないことを示している。そして、その制約は核融合発電所出力が大きくなると拡大することが併せて読み取れる。これは、「プラズマディスラプション発生時の電力系統安定性」という新たな導入制約が核融合発電所に存在することを示唆する結果である。

#### 5.4.2 結果の低次元化

こうした結果は将来の核融合発電所の導入戦略立案に有用であるものの、最大周波数偏差を目的変数として捉えた場合、変数として電力系統の容量、核融合発電所の電気出力、火力・水力・原子力・再エネの発電割合、再生可能エネルギーの出力変動の 7 つの変数 ( $P_{out}$ ,  $S_{grid}$ ,  $F_{thermal}$ ,  $F_{hydro}$ ,  $F_{nuclear}$ ,  $F_{renew}$ ,  $D_{10min}$ ) が存在し、計算結果は 8 次元となり、計 924,000 ケースに及ぶ。従って、そのままでは結果の理解並びに利用が困難であるため、結果の低次元化を試みる。理想的には、全ての結果を包括的に 2 次元平面上に示せることが望ましく、三次元化を目標とする。

はじめに再生可能エネルギーの直近 10 分間の出力変動については、代表例として、 $\sigma$  に固定する。この仮定はおよそ 86% の天候変動について安全側に評価ができるものであり、妥当なものであると考えられる。

Figure 5-20 の結果において示された等高線がほぼ直線として描画されることは、再生可能エネルギー並びに原子力発電の割合を線形結合することで、結果を低次元化できる可能性を示唆するものである。そこで筆者は電力系統の構成を表す4変数 ( $F_{\text{thermal}}, F_{\text{hydro}}, F_{\text{nuclear}}, F_{\text{renew}}$ ) を結合する事で、電力系統の特性を1つの変数で表す事を試みた。本モデルにおいて原子力発電所並びに再生可能エネルギーは共に負荷に追従しない電源としてモデル化されている。このことから再生可能エネルギーの割合  $F_{\text{renew}}$  並びに原子力発電の割合  $F_{\text{nuclear}}$  については線形結合が可能であると予測され、電力系統の特性を表す変数 Grid Characteristic Factor:  $\tau$  は Eq. 5-3 の通り定義された。 $\tau$  の最終項である  $F_{\text{hydro}}/F_{\text{thermal}}$  については、本評価モデルにおける負荷変動率は火力発電所の方が水力発電所より良いことから、電力系統の負荷追従性の悪さを表す項として設定されたものである。従って Grid Characteristic Factor:  $\tau$  は電力系統の不安定性が大きい場合に値が大きくなるよう定義されたものであり、大きい  $\tau$  は、その電力系統がより大規模擾乱に対し脆弱であることを表す。

$$\tau = F_{\text{renew}} + aF_{\text{nuclear}} + b \frac{F_{\text{hydro}}}{F_{\text{thermal}}} \quad (\text{Eq. 5-3})$$

(ただし  $F_{\text{thermal}} \neq 0$ )

ここで、 $F$  は Table 5-4 に示す各発電所の発電割合であり、 $a, b$  は係数である。 $a, b$  については、 $\tau$  を用いた予測モデルの低次元化が周波数最大偏差という結果変数の予測精度を最大とするよう最小二乗法により係数決定を行い、それぞれ 0.76 並びに 0.36 と決定された。 $a=0.76, b=0.36$  における  $\tau$  を用いた予測モデルの  $R^2$  値は 0.996 であった。再生可能エネルギーについては直前 10 分間の予期せぬ変動による瞬動予備力の減少効果があるために、係数として原子力発電(0.76)の方が再生可能エネルギー(1.0)より小さく決定されている。

本予測モデルによって得られた最大周波数偏差について、これを  $S_{\text{grid}} - \tau$  平面上にプロットする。ここで  $S_{\text{grid}}$  は系統容量である。核融合発電所出力 300 MW、600 MW、900 MW、1,200 MW のそれぞれにつき、周波数最大偏差を  $z$  軸にとり、低次元化による平均誤差とともに Figure 5-21 に示す。低次元化後の予測モデルの全平均誤差は 5.24% であり、周波数最大偏差という結果変数について、非常に精度良く予測モデルの低次元化が実現されていることが示されている。

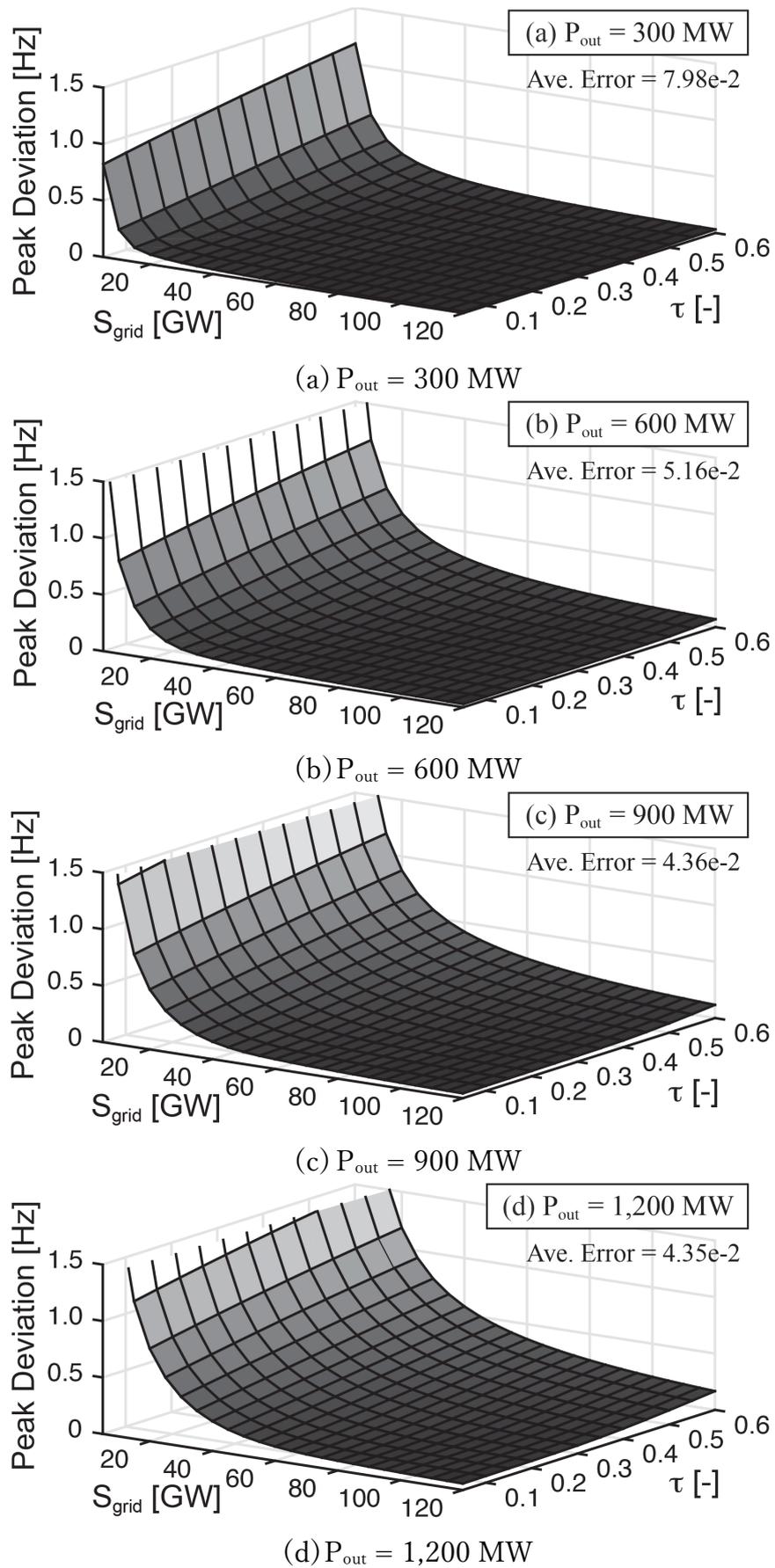


Figure 5-21 Summarized Simulation Results on  $S_{grid}$ - $\tau$  Plane [34].

Figure 5-21 は、5.4.1 節と同様に、電力系統の不安定性が増すほど、また電力系統の容量が小さくなるほど、プラズマディスラプション時の周波数最大偏差が大きいことを表している。さらに、Figure 5-21 (a)から(d)の比較からは、核融合発電所の出力が大きくなると、電力系統への悪影響も大きくなることが読み取れる。

### 5.4.3 S-t Diagram

そこで最後に、5.4.1 節と同様に Figure 5-21(a)から(d)について 0.2 Hz において等高線を引き、それを一枚の  $S_{grid} - \tau$  平面上に描画することで、Figure 5-22 を得る。Figure 5-22 では横軸に電力系統の容量( $S_{grid}$ )、縦軸に電力系統の不安定性( $\tau$ )をとっており、本図における核融合発電所出力の等高線の左上の領域が、電力系統の過渡安定度の制約により核融合発電所の建設が受容されない可能性のある領域である。本図については、横軸と縦軸の変数名から、筆者により簡単のために”S-t Diagram”と命名された。

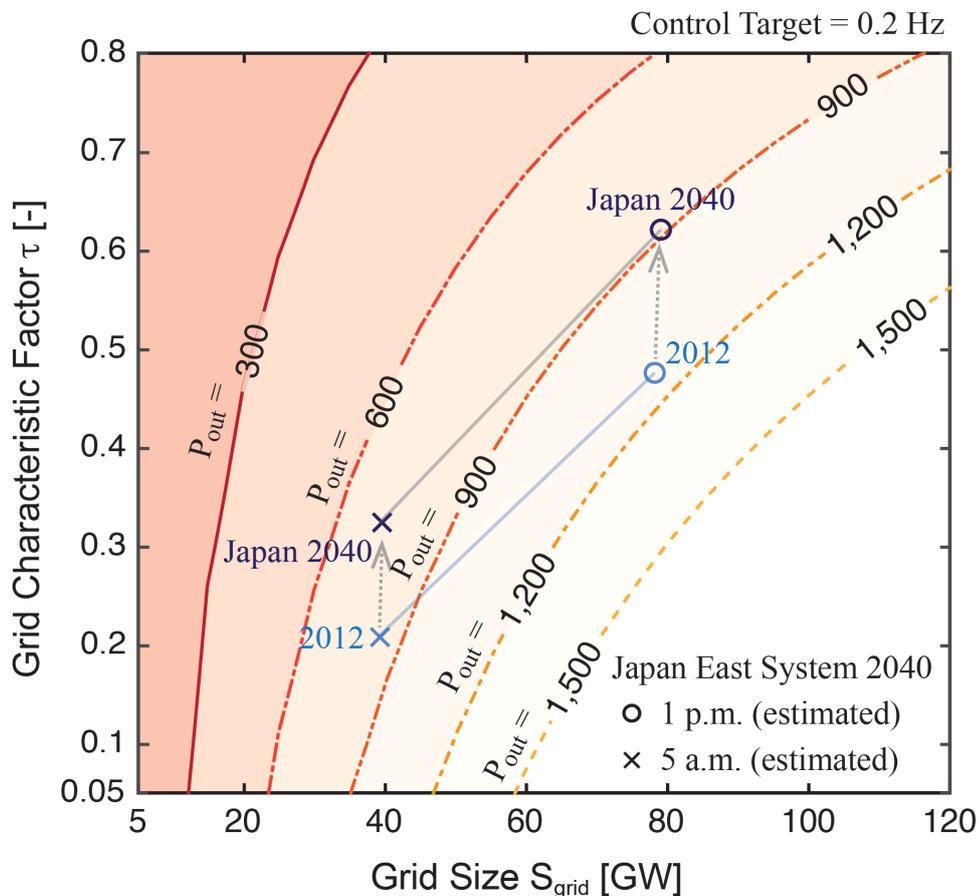


Figure 5-22 The S-t Diagram [34].

電力系統の発電構成は、同じ系統であっても時刻と共に刻々と移り変わる。従って S-t Diagram 上における電力系統のプロットも移り変わることに留意する必要がある。Figure 5-22 においては一例として、東日本の 2012 年並びに 2040 年 (Japan East System 2040) のピーク時間帯(1 p.m.)とボトム時間帯(5 a.m.)における筆者による推定構成[125]をプロットしている。電力系統の構成はこの 2 点の間を推移すると考えられるために、これらの 2 点を結ぶ直線上において、最も導入制約が厳しい点の数値を読み取ることで、電力系統の安定性による導入限界核融合発電所出力の値が読み取ることができる。Figure 5-22 の例においては、東日本の 2012 年系統における導入可能最大出力は 800 MW 程度、2040 年系統においては 700MW 程度であることが示されており、一部の原型炉計画において想定されている 1 GW 電気出力の核融合発電所の導入は東日本電力系統には難しいこと、さらにその制約が将来より厳しいものとなること、の 2 点が示唆されている。

S-t Diagram は、多様な構成の電力系統における受容性の限界が端的に示されたものであり、核融合炉の将来導入戦略の立案に資するものであると言える。

### 5.4.4 本章において開発された電力系統過渡安定度評価モデルにかかる制約

本章において構築された電力系統過渡安定度評価モデルは将来における幅広い構成の電力系統における核融合発電所の即時解列を網羅的に再現することを主眼に開発されたものである。従って電力系統周波数につき単純な Heffron-Philips モデルを用いて計算をしているために、即時解列にかかる高調波電流や電圧への影響など、実際の電力系統への導入において重要となる複数の要素につき模擬が出来ない制約が存在する。これらの要素の模擬のためには配送電系統の構成を含めより具体的な仮定が必要となるため、実際に立地を定めて核融合発電所の建設を検討する段階においては、従来通り Y 法など詳細なシミュレーションが可能な手法を用いた評価が改めて必要である。

## 5.5 結言

第 4 章において筆者はプラズマディスラプション発生時における核融合発電所の即時解列（系統切り離し）の必要性を論じたが、核融合の社会実装にあたり問題となるのは、その際における電力系統への影響である。従って本章では電力系統過渡

安定度の評価モデルを新たに構築した上で、プラズマディスラプション発生時における即時解列の電力系統安定性への影響を定量的に分析した。

結果、プラズマディスラプションに起因する即時解列時、核融合発電所の導入先電力系統の周波数偏差が 0.2 Hz を大きく逸脱するケースが存在することが確認され、これにより核融合発電所の導入が制限される電力系統の領域が存在することが明らかとなった。この電力系統周波数逸脱にかかる電力系統への受容性は導入先系統の構成並びに容量に依存することが示され、一例として再生可能エネルギーの導入が進むと同受容性は低下した。この導入制約を端的に表現するため、新たに筆者により電力系統の不安定性を表す指標である Grid Characteristic Factor:  $\tau$  が定義され、これを用いた S-t Diagram が提案された。

本結果は、「プラズマディスラプション発生時の電力系統安定性」という新たな導入制約が核融合発電所に存在することを示したものである。核融合発電所の開発にあたっては、その導入先たる将来電力系統の安定性を考慮せねば導入が制約されるという指摘は従来と視座の異なる重要な見地であり、それを定量的に示した本研究の意義は大きいと考えられる。また、提案された S-t Diagram は約 100 万通りの演算結果を精度良く二次元平面上に集約することを実現したものであり、本図の考案もまた、本章によって明らかとなった導入制約が核融合発電所導入戦略に与える影響を理解する上において有用な成果である。

本章には、出版社の規約並びに許諾に基づき、筆者らによる以下の発表文献を再構成した内容が含まれている。[31] Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Small-Scale Electrical Grids*. Fusion Science and Technology, 2017. 68(2): p. 341-345. This is an Accepted Manuscript of an article published by Taylor & Francis in Fusion Science and Technology on 20 Mar 2017, available online: <http://www.tandfonline.com/10.13182/FST15-106> [34] Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Limitation of Fusion Power Plant Installation on Future Power Grids under the Effect of renewable and nuclear power sources*. Fusion Engineering and Design, 2016. 109-111: p. 1754-1758.

# 6 核融合発電所運用にかかる電力系統過渡安定度改善手法の検討

## 6.1 導入

### 6.1.1 電力系統過渡安定度への影響改善の必要性

第5章は、将来の核融合発電所の建設にあたり、0.5回/年という頻度で発生すると予測されるプラズマディスラプションに起因する即時解列にかかる電力系統周波数への影響が改善されないならば、核融合発電所は導入先電力系統における受容性を満たすことが出来ず、導入が制約される可能性を示唆するものである。

2.2.2節における電力系統の将来予測は、今後世界中の電力系統において再生可能エネルギーの導入拡大が見込まれることを示し、今後45-90GW容量の電力系統が新たな市場として興隆することを示唆している。さらに5.4.3節の解析では、今後の再生可能エネルギー導入の拡大によっては将来の日本における核融合発電所導入でさえ制約される可能性が示されており、本制約は将来の核融合発電所の導入に際し少なからざる影響を与えるものであると考えられる。

従って、核融合発電所の将来社会への成功裏の導入のためには、本影響を緩和する手法を考案せねばならない。言うまでもなく本制約の克服方法の1つは、プラズマディスラプションの発生頻度を限りなくゼロに近づけることである。しかしながら、導入初期の段階からプラズマディスラプションを根絶することは難しいと考えられており[73]、特に初期段階の核融合発電所においてはプラズマディスラプションが発生することを予め想定した上で、プラズマディスラプション時の電力系統への影響を軽減する手法について検討することが不可欠であると言える。

### 6.1.2 本章の目的

本章の目的は、将来の核融合発電所の電力市場受容性を改善するため、プラズマディスラプション時の電力系統過渡安定度への影響を改善する装置について概念設計を行うとともに、その有効性について定量的に評価することである。

## 第6章 核融合発電所運用にかかる電力系統過渡安定度改善手法の検討

そこで本章では、具体的な緩和手法として1)蓄熱装置による緩和2)蓄電装置による緩和の2手法を示し、それらの有効性につき本論文において考案されたモデルを用いて評価する。

### 6.1.3 先行研究

#### 6.1.3.1 プラズマディスラプションの予測並びに緩和

プラズマディスラプションは、トカマク炉の運用にあたり、その発生時にプラズマ対向機器にダメージを与え得る現象として早くより認識されてきた[126]。この観点から、プラズマディスラプションの頻度を可能な限り下げると共に、発生が避けられない場合にはそれを予測した上で緩和する手法の研究が続けられている。

4.1.1.1 節においても記述の通り、プラズマディスラプションの発生に先駆け Precursor として観測される信号の変化を正しく捉え判別することで、プラズマディスラプション発生予測が可能となる[78]。この予測に基づき、プラズマディスラプションが不可避と判断された場合に、意図的に負荷の軽いプラズマディスラプションを発生させることで負荷を低減するとともに時定数をコントロールし現象の緩和を試みることが検討されている。しかしながら、現状においてプラズマディスラプションを精度よく予測できるのは発生直前の30-100ミリ秒前に限られている[127]。加えて、各種緩和手法は、プラズマディスラプションの電流消滅の時定数を数十ミリ秒から数百ミリ秒へと延長する効果しか持たない[128]。従って、第4章で示された一次冷却系の温度低下の時定数が数秒～数十秒オーダーであったことを鑑みれば、これら従来検討されてきたプラズマディスラプションの緩和手法は、核融合炉にかかる負荷を軽減する観点からは有用であるものの、プラズマディスラプションに起因する即時解列にかかる電力網過渡安定度改善には寄与しないことが予測される。

#### 6.1.3.2 溶融塩中間熱交換器による発電安定化

3.2.3 節において概観の通り、EUROfusion が構想する EU DEMO はパルス運用を前提としており、そのため高温溶融塩を巨大なホットプールに貯めることで、dwell 時の発電出力低下を抑える設計検討が為されている。従って、EU DEMO の設計検討を目的とした 4.1.3 節において示された研究においては本溶融塩中間熱交換器 (IHX) が検討されている。Kiviluoto ら(2016) [85] は AproS モデルに基づき溶融塩蓄

熱装置の有用性を検討しており、パルス運転における核融合反応の停止に溶融塩中韓熱交換器(IHX)が有効であると示している。Malinowski ら(2017) [86]も同様の研究を GateCycle 上で実施し、必要となる溶融塩中韓熱交換器(IHX)の装置容量について検討結果を示している。

これらの先行研究は、EU DEMO において検討されている溶融塩中韓熱交換器(IHX)が、本論文が論じているプラズマディスラプションに際する熱出力の消滅についても有効であることを示唆している。しかしながら一方で、溶融塩中韓熱交換器(IHX)は装置規模が非常に大きく、定常核融合発電所におけるプラズマディスラプションという発生頻度の比較的低い現象の緩和を目的として導入をすることは経済上、並びにインベントリ増加の観点から最善ではないと考えられる。

### 6.2 蓄熱装置による緩和

#### 6.2.1 概要

本論文において提案する核融合発電所のプラズマディスラプション時の影響を緩和する第一の手法は、発電システムの内部に熱浴を設けることで、プラズマディスラプション時の冷却材温度低下速度を物理的に緩和する手法である。これはプラズマディスラプション発生時の熱源の喪失に対応するため、発電システムの熱容量を増加させることで、温度低下を物理的に緩和することを目的としている。発電システムの適切な箇所に適切な容量の熱浴を導入することが可能であれば、即時解列を回避し発電を継続できる可能性があり、電力系統の過渡安定度に与える影響について大きな改善効果が期待される。

6.1.3.2 節において記述の通り、EU DEMO において想定される溶融塩中間熱交換器についても同様の意図のもとに設計されているものである。しかしながら、数年に1度の次元で発生するプラズマディスラプションの緩和のため、溶融塩中間熱交換器のような規模の大きい熱浴を設けることは合理的でないと考えられる。従って、本論文では、より単純な熱浴として、蓄熱体として金属球を敷き詰めた蓄熱体充填U字蒸気発生器を設計し、これを導入することによる緩和効果を評価する。

6.2.2 設計

本論文において新たに概念設計された「蓄熱体充填 U 字蒸気発生器」を Figure 6-1 に、その主要パラメータを Table 6-1 に示す。本概念設計は、単純に通常の U 字蒸気発生器の半径を  $\Delta R$  [m] 拡張し、得られた空間に 68% の充填率で蓄熱球を充填した構造となっている。蓄熱体としては、耐圧・耐熱性を有する安価な材料として、SUS304 を仮定した。

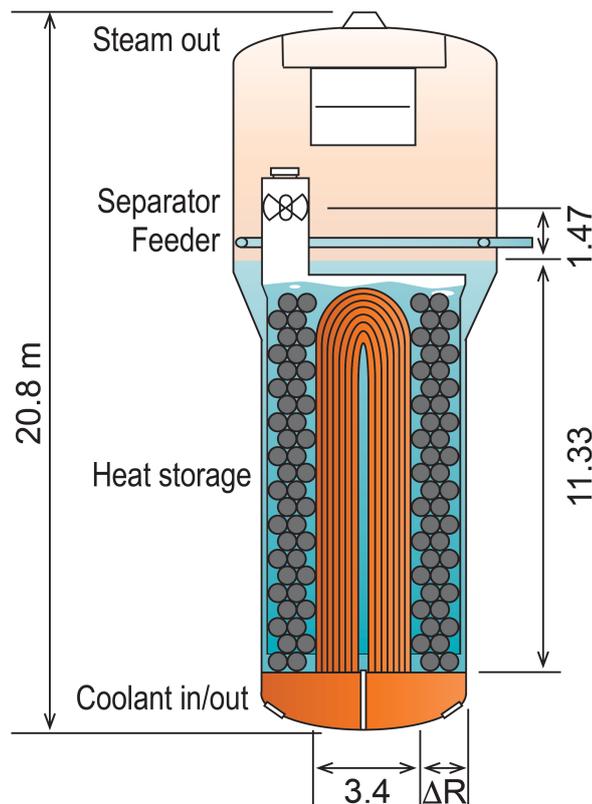


Figure 6-1 Cross-section Diagram of the Heat Storage-filled U-tube Steam Generator.

Table 6-1 Design Parameters of the Heat Storage-filled U-tube Steam Generator.

Parameter	Value	Unit
Radius of Spherical Heat Storage	50	mm
Packing Fraction of Heat Storage	0.68	
Heat Storage Material	SUS304	
SUS304 Density [104]	8,030	kg/m <sup>3</sup>
SUS304 Specific Heat [104]	500	J/(kg K)
Mass of Heat Storage - $\Delta R = 1$ m	844,100	kg
Mass of Heat Storage - $\Delta R = 2$ m	2,071,900	kg

### 6.2.3 評価方法

本緩和装置の有効性については、第 5 章において構築した核融合発電所モデルの蒸気発生器を蓄熱体充填 U 字蒸気発生器に入れ替え、同様にプラズマディスラプション時の挙動をシミュレーションすることで評価を行った。

構築された蓄熱体充填 U 字蒸気発生器の Modelica モデルを Figure 6-2 に示す。本モデルにおいては蓄熱体への伝熱は二次冷却剤を介して行われるものとしており、一次系からの直接伝熱は考慮していない。また、蓄熱体内部における温度勾配についても考慮していない。

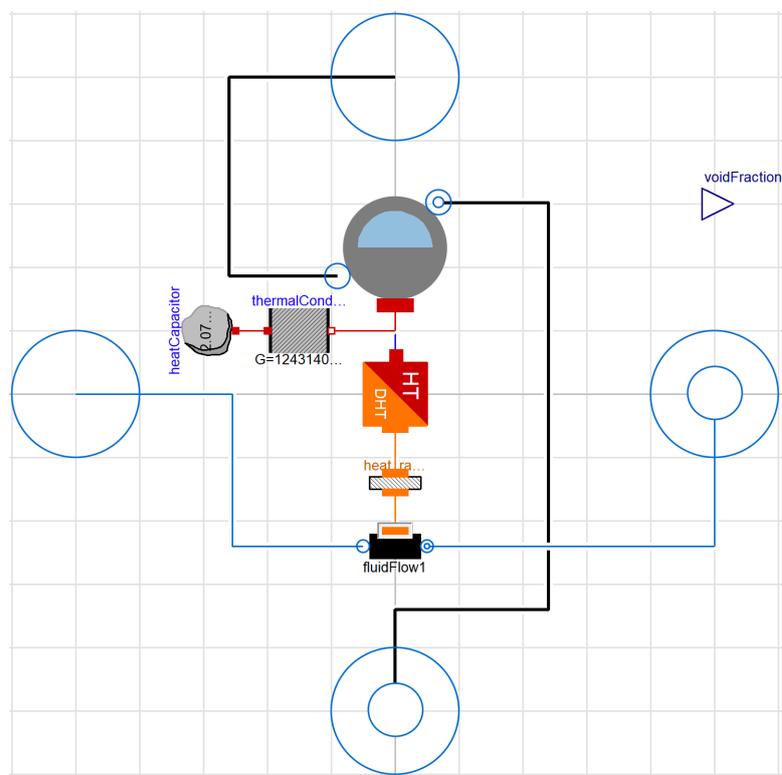


Figure 6-2 Modelica Model of the Heat Storage-filled U-tube Steam Generator.

### 6.2.4 結果

蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の導入は、プラズマディスラプション発生時における蒸気発生器にの水位上昇の緩和に効果を示した。Figure 6-3 に蓄熱材の充填が無い場合・拡張半径 1 m の場合・拡張半径 2 m の場合の 3 例におけるプラズマディスラプション発生時の蒸気発生器の水位の推移を示す。Figure 6-3 は横軸にプラズマデ

ィスラプション発生後の時間、縦軸に推移をとっており、灰色線が蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の導入がない場合（即ち 4.4.2 節における結果）を示している。

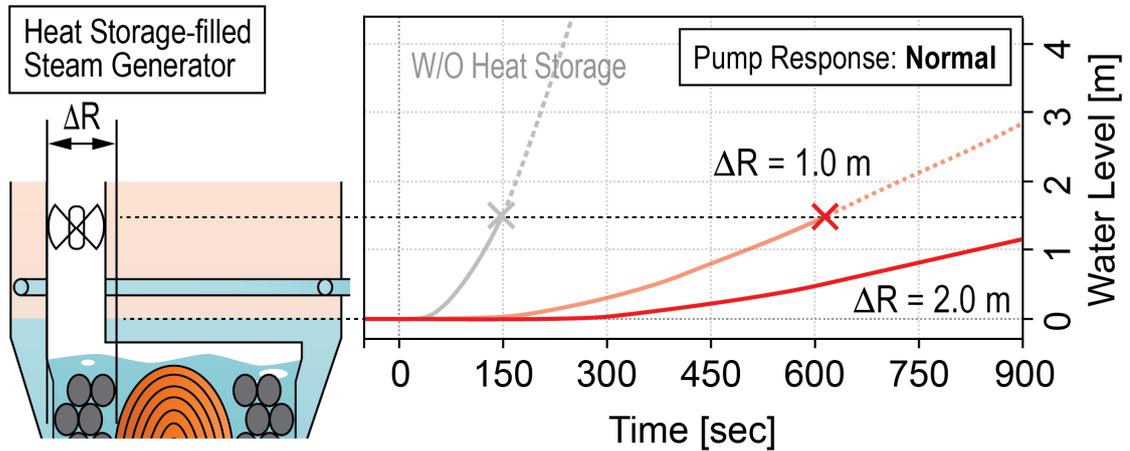


Figure 6-3 Water Level at the Heat Storage-filled Steam Generator upon Disruption.

Figure 6-3 の結果は、蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の導入によって蒸気発生器水位の上昇速度が大きく抑えられていることを示している。特に、蒸気発生器の半径を 2 m 拡張し、蓄熱材を充填することで、汽水分離器における溢水を 900 sec の間回避できることが示されている。これは、蓄熱材充填 U 字蒸気発生器を導入することで、プラズマディスラプション発生時においても即時解列を必要とせず、暫くの時間発電を継続できる可能性が示唆されるものである。

発電を継続した場合における発電出力と一次冷却材温度について、Figure 6-4 に示す。Figure 6-4 は 4.4.2 節と同様、(a)において一次冷却材のブランケット入口／出口温度を、(b)において発電端出力を示している。Figure 6-4 においても、灰色線が蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の導入がない場合を示す。

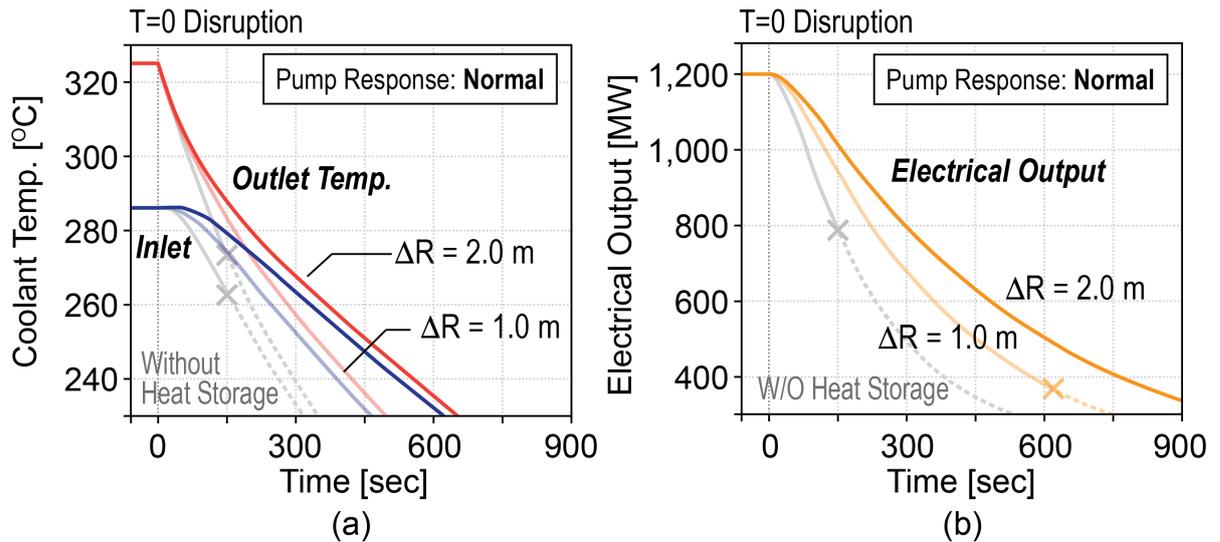


Figure 6-4 Plant Behavior with the Heat Storage-filled Steam Generator. (a) Primary Coolant Temperature (b) Electrical Output

Figure 6-4 の結果は、蓄熱材の充填により、発電出力の低下速度についても同様に緩和に成功していることを示している。

プラズマディスラプション発生後 900 秒間の発電継続が可能であること、並びに発電出力の低下速度が低下されることにより、電力系統周波数へ与える影響も著しく緩和された。一例として、Table 5-5 に示した電力系統について、蓄熱材が導入されていない場合(即時解列)、導入されている場合の双方における、プラズマディスラプション発生時の系統周波数の挙動を Figure 6-5 に示す。Figure 6-5 は横軸にプラズマディスラプション発生後時間を、縦軸に電力系統周波数を示している。

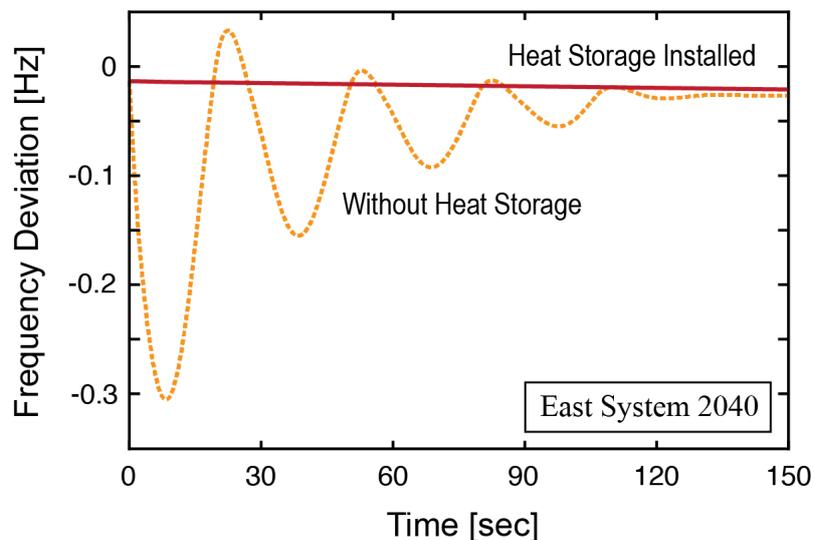


Figure 6-5 Frequency Behavior with and without Heat Storage.

Figure 6-5 に示された通り、蓄熱材充填蒸気発生器の導入により発電の継続が可能となった場合、プラズマディスラプションの電力系統の過渡安定度への影響は最小化され、周波数変動はほぼ定常偏差に限定されていることが示唆された。これは核融合発電所が、他の大規模発電所と同条件での競争が可能になることを意味する。

### 6.2.5 考察

以上より、蓄熱材充填 U 字蒸気発生器は、核融合発電所におけるプラズマディスラプション発生時の電力系統周波数への影響の緩和が可能であると考えられる。

必要な蓄熱材の容量については、ディスラプション時におけるプラズマ再立ち上げまでに想定する時間に依存する。もし、プラズマの再立ち上げに要する時間が 15 分以下である場合には、その時間の間だけ運転を継続出来ればよく、拡張半径は 2 m 以下で良いと考えられる。

一方で、15 分以下でのプラズマ再立ち上げが望めない場合、核融合発電所はバックアップ電源が立ち上がり、電力市場に予備力が供給されるまで運転を継続出来ることが望ましい。現在、多くのマーケットにおいてバランス市場の最小間隔は 15 分とされており、これはおおよそガスタービン発電所の立ち上げ時間に相当する。従って、この場合には、900 sec 発電を継続できる容量として、拡張半径は 2 m が必要であると考えられる。

## 6.3 蓄電装置による緩和

### 6.3.1 概要

本論文が提案する緩和のもう一つの手法は、発電システムの外部において、電力系統に蓄電装置を接続することで、プラズマディスラプションにかかる即時解列時に失われる電気出力を電氣的にオフセットする手法である。即ち、発電システム内部における緩和は実施せず、発電機の解列により失われた電気出力を瞬時に蓄電装置によって補完することで緩和を実施するものである。本手法の概念について Figure 6-6 に示す。

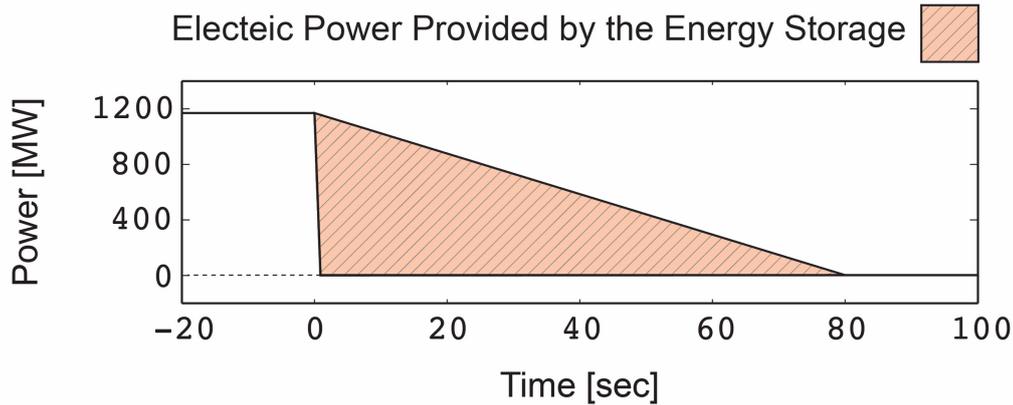


Figure 6-6 Illustration of the Mitigation with Energy Storages.

Figure 6-6 は横軸にプラズマディスラプション発生後時間を、縦軸に電気出力を示したものであり、解列によってステップ状に失われた電気出力を蓄電装置により補完している様子を示している。

### 6.3.2 設計

蓄電装置としては応答の速さから化学電池または燃料電池が望ましい。一方で本手法は、物理的立地として核融合発電所の内部・外部を問わず、電力系統に接続をすることで一定の効果を持つと考えられる<sup>20</sup>。従って、本蓄電装置の設計については、その設置場所によって以下の3ケースが考えられる。

1 例目は、核融合発電所内のオンサイトに蓄電装置を建設し、送電端において出力減少を補完するケースである。この場合、リチウムイオン電池・NAS 電池等の化学電池、さらには燃料電池が考えられる。

2 例目は、電力系統に予め存在するバランスサービス業者の提供する蓄電池の容量を契約により利用するケースである。この場合、蓄電装置の種類は提供する事業者によって異なることが予測され、化学電池からフライホイールまで幅広い選択肢が考えられる。

3 例目は、各家庭単位で備える蓄電装置等を、アグリゲーションにより活用するケースである。今後、先進国においては、各家庭・事業所への燃料電池の導入がさらに進むと考えられている。一方で、発展途上国においては電気自動車の導入の進展が見られ、先進国・発展途上国の双方において、需要地における蓄電装置の導入

<sup>20</sup> 但し、本モデルでは電圧につき考慮をしていない点に留意する必要がある。

量は大きく増加する。これら電池のアグリゲーションによる VPP (Virtual Power Plant) は応答速度が極めて早いことが予測され、核融合発電所の緊急停止時の出力オフセットに十分活用可能であると考えられる。

### 6.3.3 評価方法

本研究においては、化学電池をブロック線図によりモデル化した上、これを第5章で構築した電力系統モデルに接続する。化学電池が接続された電力系統の模式図を Figure 6-7 に示す。ここで、本モデルは純粋に電気出力のバランスのみを計算するため、化学電池の接続された地理的条件は問題とならない。即ち、本モデルは先述の3ケース全てを包括しているものであると言える。

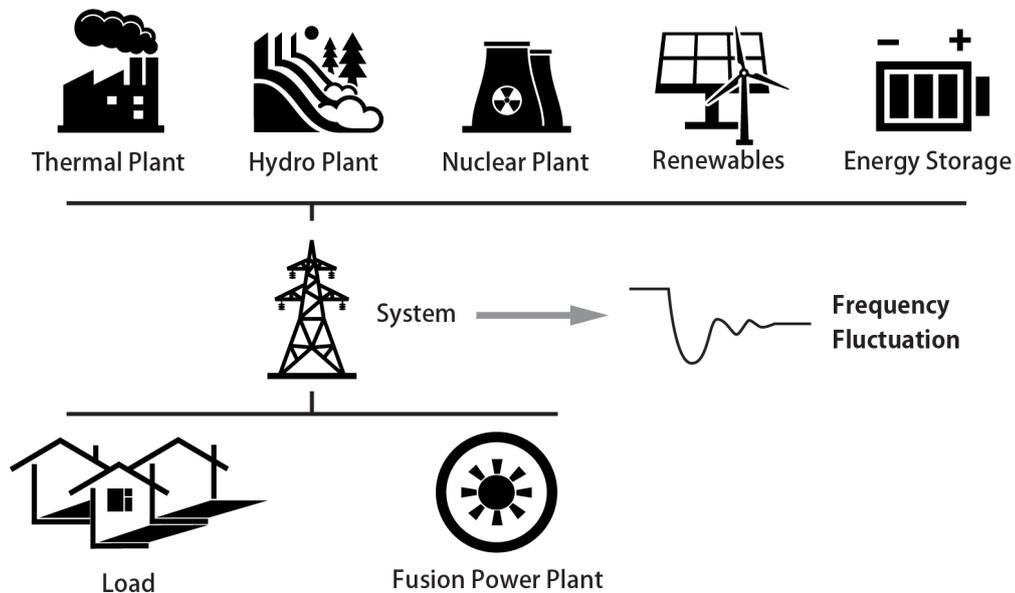


Figure 6-7 Illustration of the Power System Model with an Energy Storage.

本研究においては蓄電装置について、入江(2009)によるモデル[41]を基に、200 ms の一次遅れを持つ理想バッテリーとして Figure 6-8 の通りモデル化した。 $E_{\text{output}}$  [MW]は蓄電装置の最大出力を、 $E_{\text{storage}}$  [MWh]は蓄電装置の容量を表している。本モデルにおいて用いた一次遅れ時定数の 0.1022 sec は NAS 電池を模擬したものである。しかしながら、多くの化学電池・燃料電池が同程度の応答速度を有しており、本研究によって得られた結果は、他の蓄電装置による効果としても読み替えることが可能であると考えられる。

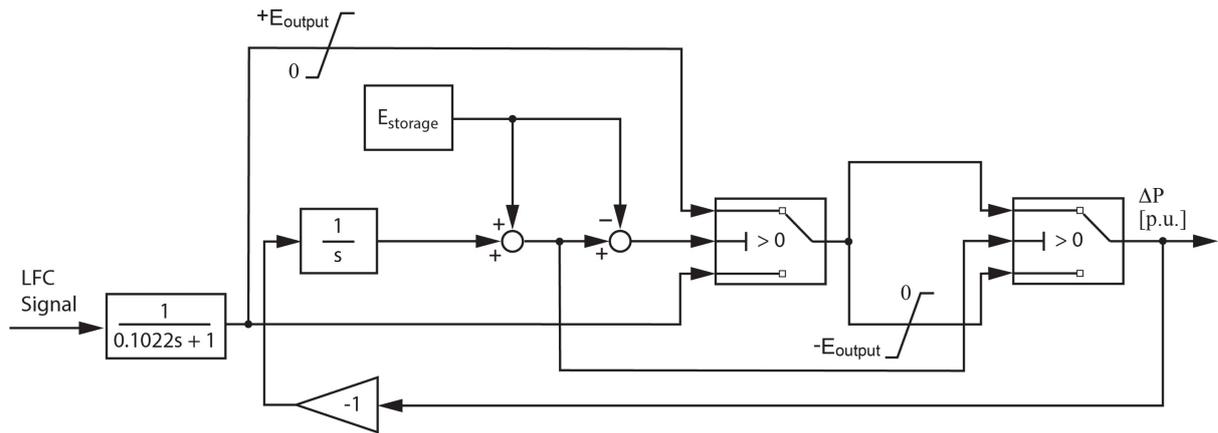


Figure 6-8 Block Diagram of the Energy Storage Model [31, 41].

蓄電装置は、プラズマディスラプション発生時、LFC 信号に基づき運用される。ここで、LFC は、プラズマディスラプション発生時、緊急時運用としてプリセットとして蓄電装置に Figure 6-9 に示す信号を出力する。Figure 6-9 は横軸に時間、縦軸に出力信号を示している。出力信号は定格出力に対する相対値として p.u.値(per unit 値)により表している。この信号出力についてはロジック遅れ時間として 300 ms を設定することで、実システムのシステムを模擬している [40]。

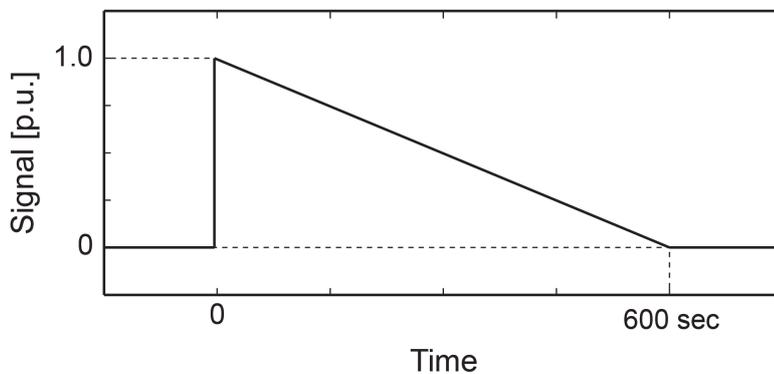


Figure 6-9 LFC Signal to the Energy Storage upon Disruption.

これらのブロックについて、Figure 6-10 に示す通りの接続を行うことで、蓄電装置を備えた電力系統の模擬を行う。電力系統の構成については、Table 6-2 に示した 96,000 通りの構成について計算を実施した。

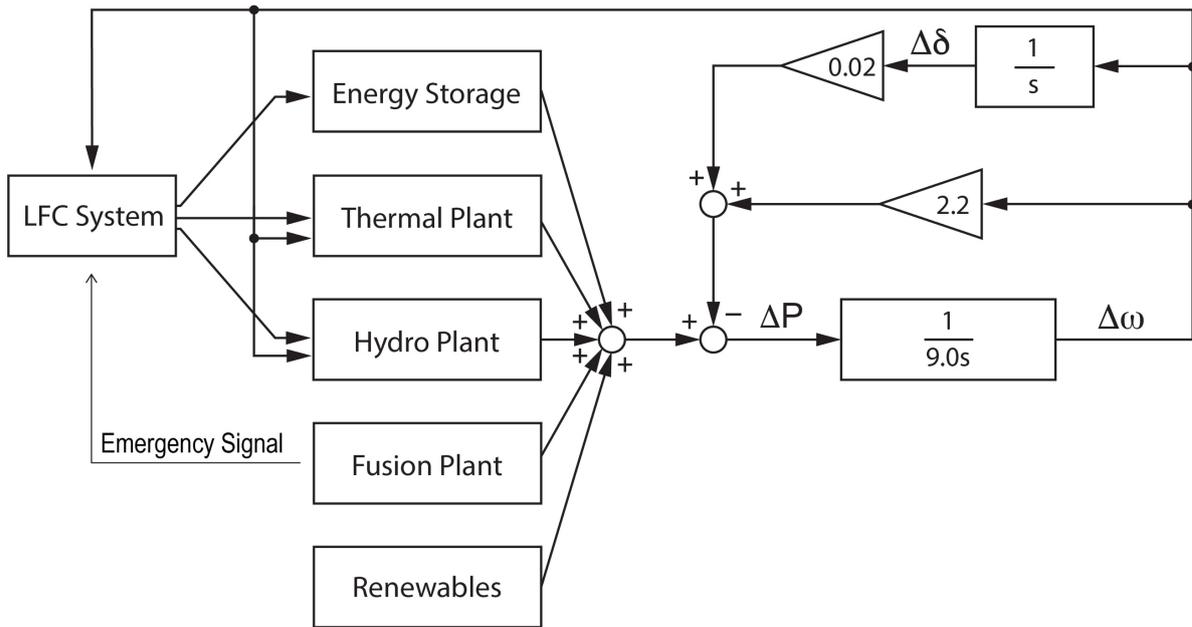


Figure 6-10 Block Diagram of the Power System Model with an Energy Storage [31].

Table 6-2 Power System Configuration with an Energy Storage.

System Parameter	Range	Step
Fusion Power Plant Electrical Output, $P_{out}$	100 – 2,000 MW	100 MW
Grid Size, $S_{grid}$	5 – 100 GW	5 GW
Grid Characteristic Factor, $\tau$	0.05 – 0.6	0.05
Renewable Output Fluctuation in the Last 10 min	$-\sigma$	–
Max. Output of Energy Storage, $E_{output}$	0 – 2,400 MW	5 MW

### 6.3.4 結果

蓄電装置を組み込んだ電力系統において核融合発電所の即時解列を再度模擬することで、蓄電装置による影響緩和効果の評価を実施した。結果、プラズマディスラプション発生時、電力系統において失われた電気出力を補うことで、電力系統周波数の安定化に寄与することが確認された。その効果は、核融合発電所出力と、蓄電装置出力のバランスによって決定された。

一例として、Table 5-5 に示された系統において出力 1,200 MW の核融合発電所がプラズマディスラプションを起こしたと仮定し、240 – 1,200 MW の出力を持つ蓄電装置が電力系統に導入をされている場合の電力系統周波数の挙動を Figure 6-11 に示す。Figure 6-11 は横軸にプラズマディスラプション発生後時間、縦軸に電力系統周波数を示している。比較のため、蓄電装置を備えていない電力系統における周波数

挙動、並びに出力が 240–1,200 MW まで 5 ケースの蓄電装置を備えた電力系統における周波数挙動を示している。

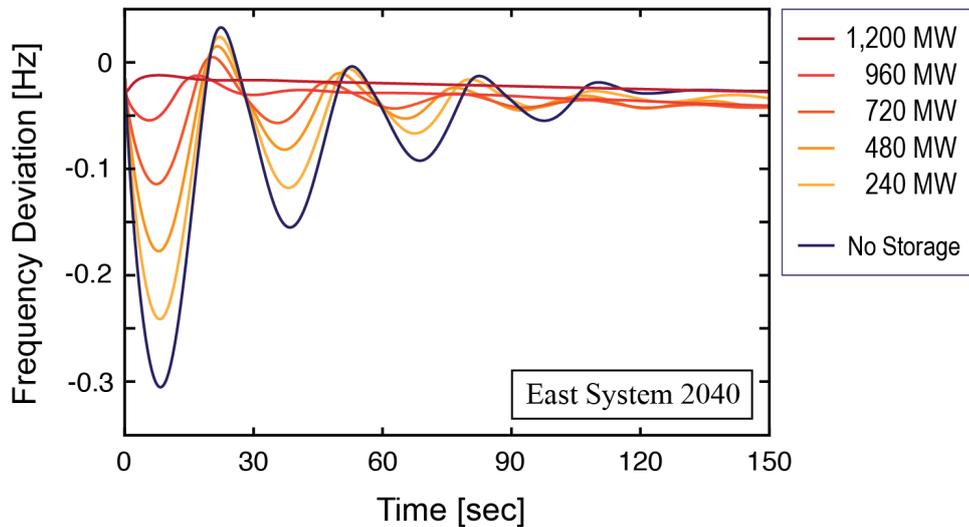


Figure 6-11 Utility Frequency Behavior upon Disruption with an Energy Storage Installed [129].

Figure 6-11 の結果から、蓄電装置の出力が核融合発電所の出力に近づくほど最大周波数偏差が小さくなり、緩和効果が大きいことが読み取れる。従って、本結果は、適切な出力の蓄電装置を用いることで、プラズマディスラプションにかかる即時解列時の電力系統過渡安定性を大きく改善できることを示唆している。

### 6.3.5 考察

#### 6.3.5.1 電力系統の構成に応じた必要蓄電装置出力

蓄電装置の活用にあたっては、導入先の電力系統と、核融合発電所の出力に応じて、蓄電装置の出力を適切に選択することが重要となる。そこで、プラズマディスラプションにかかる即時解列の最大周波数偏差を 0.2 Hz 以内に収めるために必要な蓄電装置の必要出力について、計 96,000 通りの構成について計算を実施した。

はじめに、核融合発電所出力  $P_{out}$  を 1,500 MW に固定した場合の結果について、 $S$ - $\tau$  図上に三次元プロットに示し Figure 6-12 に示す。本図は高さ ( $z$  軸) に、プラズマディスラプション時の最大周波数偏差を 0.2 Hz に抑えるために必要な最小の蓄電装置出力を示している。

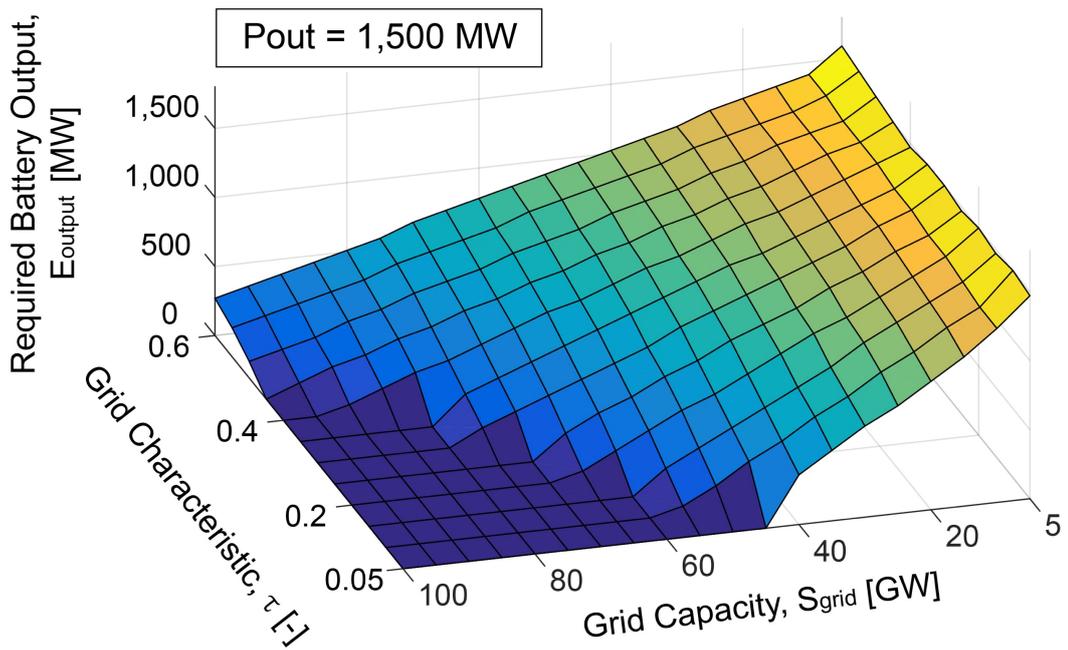


Figure 6-12 Required Battery Output, S-T Diagram ( $P_{out} = 1,200$  MW).

Figure 6-12 は、たとえ同じ電気出力の核融合発電所への採用であっても、より電力システムのサイズが小さいほど、また電力系統構成の不安定性が増すほど、大きな出力の蓄電装置が必要となることを示している。逆に、本図において濃青で示された  $E_{output} = 0$  における平面領域は、核融合発電所の導入にあたり蓄電装置の必要のない領域を示していると言える。

また同様に、今度は Grid Characteristic Factor  $\tau$  を 0.05 に固定した場合の必要蓄電装置出力について、核融合発電所出力—電力系統容量を x-y 平面として三次元プロットにて Figure 6-13 に示す。

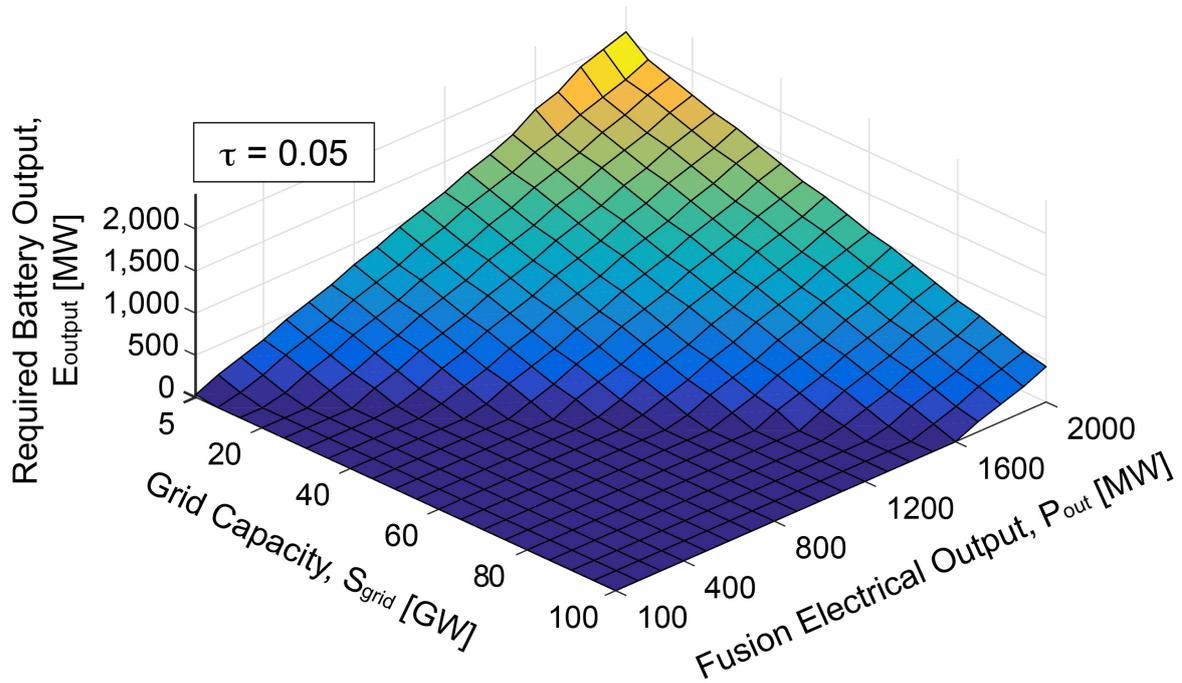


Figure 6-13 Required Battery Output,  $P_{\text{out}}$ -Gsize ( $\tau = 0.05$ ).

Figure 6-13 は、電力系統容量が小さくなるにつれ、また核融合発電所の出力が大きくなるにつれ、必要な蓄電装置の容量が大きくなることを示している。これらの結果につき、次節において定量的に分析を加える。

### 6.3.5.2 必要蓄電装置出力予測モデル

こうした結果は、将来における核融合発電所の導入戦略の立案にあたり、有益な示唆を与えるものである。しかしながら計算結果は、 $\tau$ による低次化を考慮に入れてもなお4次元配列であり、そのままでは簡易に利用が出来ない。例えば、将来的なシステムコードへの統合等を考えた際、必要パラメータから一意に必要な蓄電装置容量を計算できる式が確立できれば、非常に扱いやすい形で本研究の骨子を表現できたことになると言える。

そこで、本計算により得られた結果について、 $E_{\text{output}}$ を従属変数、 $S_{\text{grid}}$ 、 $P_{\text{out}}$ 、 $\tau$ の3変数を独立変数として、重回帰分析を実施した。回帰式の評価には、赤池ら(1974)の情報量基準(AIC)[130]を用いた。回帰分析結果の概要を Table 6-3 に示す。

Table 6-3 Regression Results for  $E_{\text{output}}$ .

Model Type	Variable	AIC	Adjusted R <sup>2</sup>	p-value
Means model	-	18459.8	-	-
Simple linear regressions	$\tau$	18458.0	0.0011	0.049 *
	$S_{\text{grid}}$	18018.0	0.1626	0 ***
	$P_{\text{out}}$	17393.8	0.3479	0 ***
Multiple linear regressions	$P_{\text{out}} + S_{\text{grid}} + \tau$	10987.3	0.95	0 ***
Multiple regressions with interaction	$P_{\text{out}} + S_{\text{grid}} + \tau + P_{\text{out}} * S_{\text{grid}} + S_{\text{grid}} * \tau + \tau * P_{\text{out}}$	7237.5	0.9889	0 ***
	$P_{\text{out}} + S_{\text{grid}} + P_{\text{out}} * S_{\text{grid}} + S_{\text{grid}} * \tau + \tau * P_{\text{out}}$	<b>7235.5</b>	<b>0.9889</b>	<b>0</b> ***

$P_{\text{out}}$ ,  $S_{\text{grid}}$ ,  $\tau$  の全ての独立変数について、従属変数と有意な正の相関関係が認められた。(それぞれ p 値 0\*\*\*, 0\*\*\*, 0.049\*) しかしながら、いずれの独立変数も、単体では十分な精度を示す予測モデルとはならなかった。(それぞれ調整済み R<sup>2</sup> 値 0.35, 0.16, 0.00)

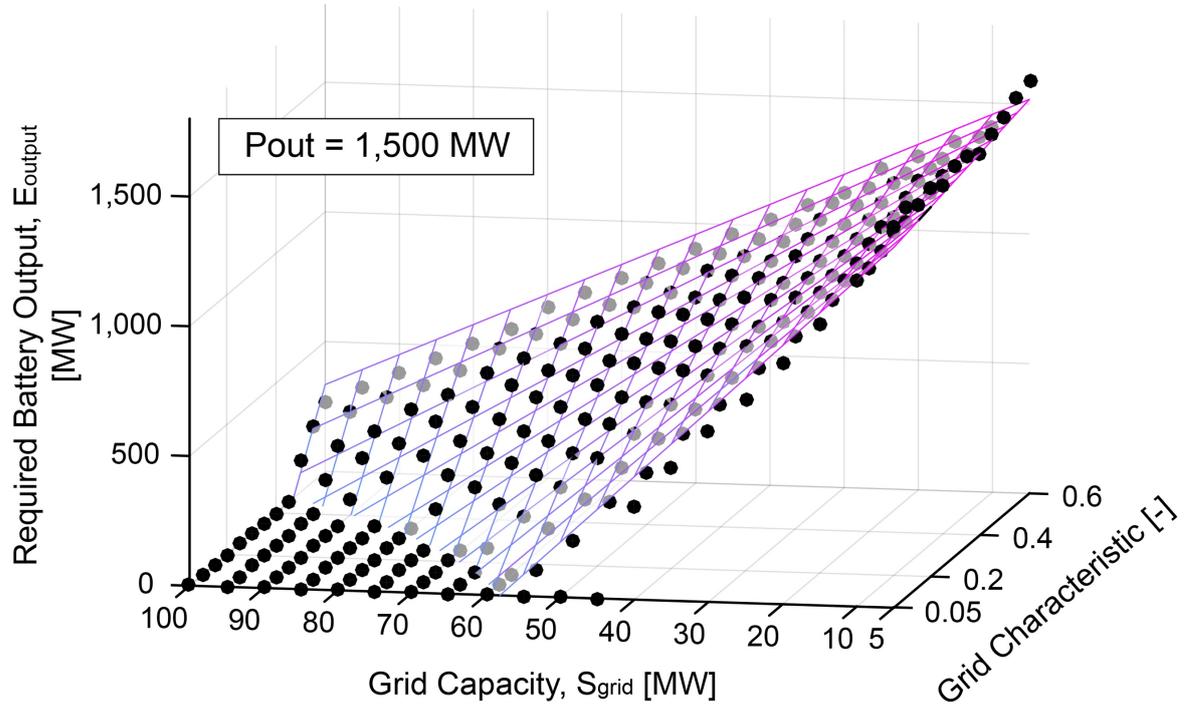
線形重回帰は、予測モデルの精度を著しく向上させ、AIC は 10987 まで減少し、調整済み R<sup>2</sup> 値は 0.95 まで向上した。さらに、重回帰に交互作用項を加えることで、最終的に AIC 7235.5、調整済み R<sup>2</sup> 値 0.9889 を示すモデルを得た。得られたモデルの式並びにパラメータを Eq. 6-1 並びに Table 6-4 に示す。

$$E_{\text{output}} [\text{MW}] = \beta_0 + \beta_1 P_{\text{out}} + \beta_2 S_{\text{grid}} + \beta_3 P_{\text{out}} * S_{\text{grid}} + \tau * (\beta_4 P_{\text{out}} + \beta_5 S_{\text{grid}}) \quad (\text{Eq. 6-1})$$

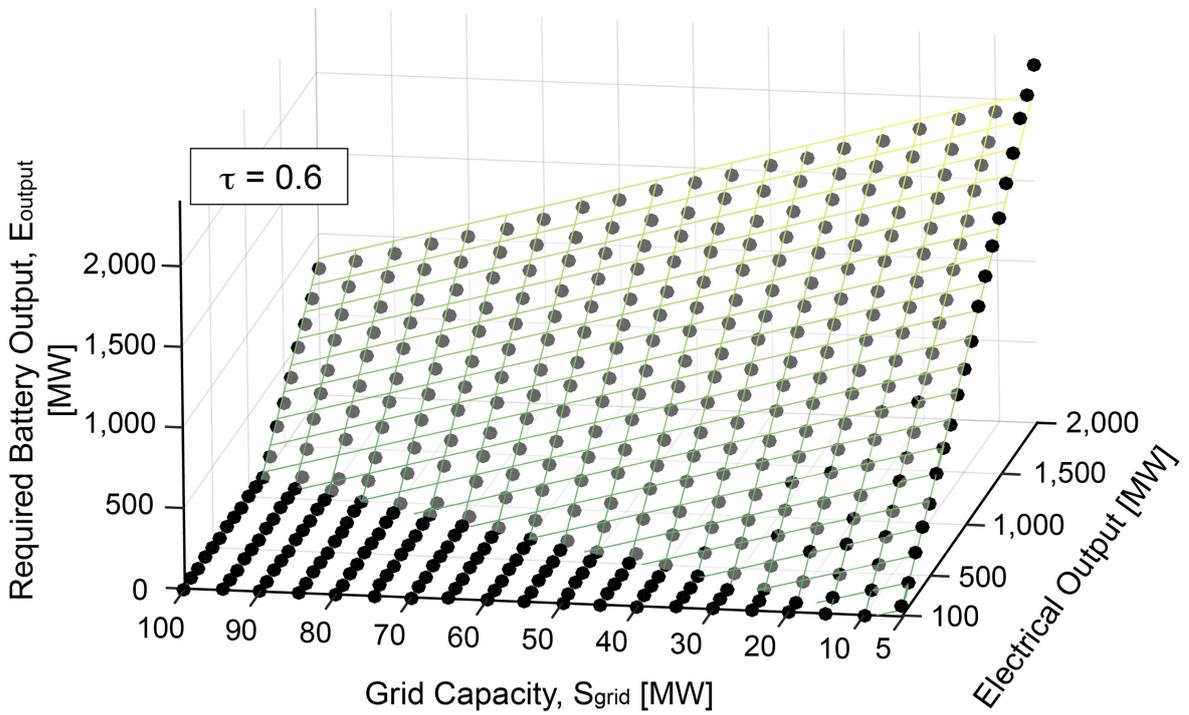
Table 6-4 Parameters of Eq. 6-1.

	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
	-2.51E+00	5.06E-01	-1.34E-02	-1.65E-07	3.73E-02	1.24E-02
p-value	0.320	0.000***	0.000***	0.002***	0.000***	0.000***

本重回帰式によって得られる予測結果と、実際のシミュレーション結果の一致を示したものが Figure 6-14 である。Figure 6-14 は S- $\tau$  上に必要となる蓄電装置出力をプロットしたものであり、重回帰式による予測をメッシュで、シミュレーション結果をドットで描画している。Figure 6-14 からは、Eq. 6-1 に示された予測モデルが、シミュレーション結果を非常によく予測していることが読み取れる。



(a)  $P_{\text{out}} = 1,500 \text{ MW}$



(b)  $\tau = 0.6$

Figure 6-14 Simulation Results (Dot) vs. Prediction Model (Mesh).

## 6.4 緩和装置導入の実現性にかかる考察

6.2.4 節において示された結果は、U字蒸気発生器の半径を2 m 拡張し、その空間に蓄熱材となる SUS304 球を敷設することで、プラズマディスラプション発生時においても15 分間発電を継続できることを示した。また、6.3.4 節における結果は、適切に出力が設計された蓄電装置を電力系統に接続することで、電氣的にプラズマディスラプションの影響を緩和出来ることを示した。

しかしながらこれらの緩和装置は本論文が新たに提案するものであり先行導入例が存在せず、技術的並びに経済的な実現性については明らかでない。従って本節において、これらの蓄熱装置の核融合発電所への導入にかかる技術的並びに経済的な実現性について考察を行う。

### 6.4.1 蓄熱装置導入の実現性

#### 6.4.1.1 技術的実現性

蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の製造にあたり、技術的課題となり得るのは U 字蒸気発生器の外径を拡大して製造する工程である。この工程の技術的実現性は製造工場における製造設備に依存するものの、軽水炉向け蒸気発生器製造工場は納入先によって大きく異なる多様な仕様の蒸気発生器に対応できるよう設計されており[131]、製造は十分可能であると考えられる。ただし、U 字蒸気発生器は特に伝熱管部の破断を避けるためデリケートな取扱いが求められる装置であることから、蓄熱材の充填方法については材料力学・流体力学上さらなる検討が必要であることに留意する必要がある。

核融合発電所への本装置の設置にかかる技術的実現性であるが、一般に蒸気発生器の設置において問題となるのは幅ではなく高さとなる。これは核融合発電所においても軽水炉と同様、蒸気発生器は炉よりも高い位置に設置されることが計画されているためである。一例として SlimCS において想定されている蒸気発生器の配置図を Figure 6-15 に示す。Figure 6-15 においても蒸気発生器は建屋の天井近くに設置されることが想定されていることが確認でき、高さ方向には余裕が少ない一方、水平方向には一定の余裕があることが認められる。

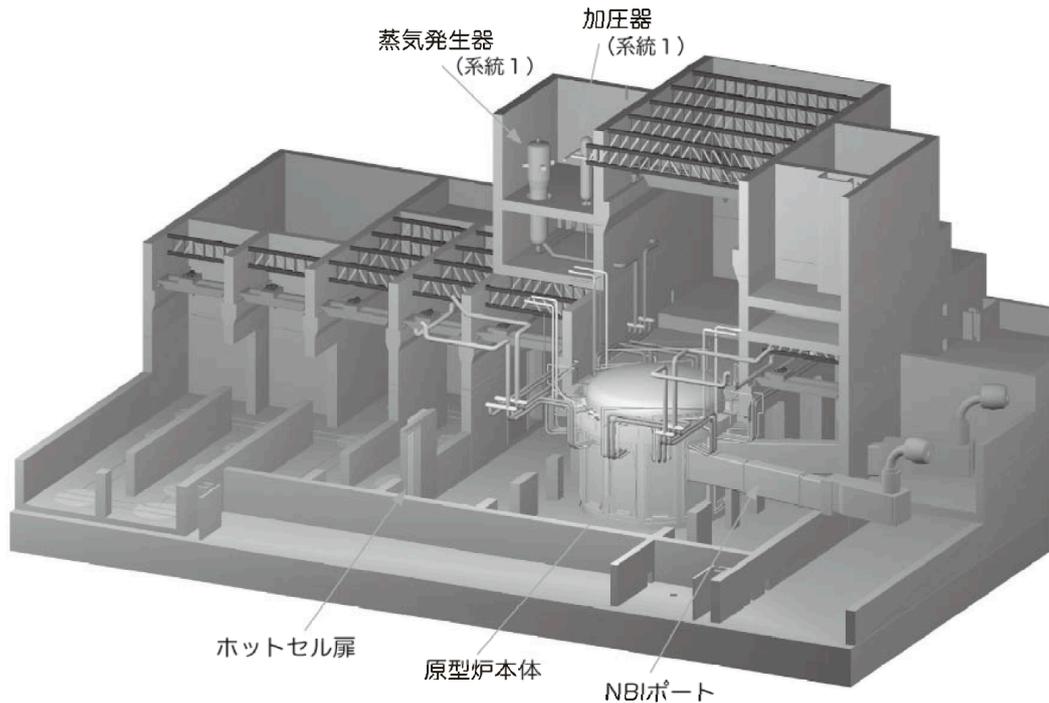


Figure 6-15 Plant Building Design of SlimCS [64].

従って、水平方向に外径を拡張した蓄熱材充填 U 字蒸気発生器は、従来の蒸気発生器を置換するにあたり建屋に関し最小限の設計変更のみしか要しないと考えられ、よって発電所への設置にあたっても技術的実現性は高いと考えられる。

#### 6.4.1.2 経済的実現性

蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の経済的実現性を考察するため、本装置の製造コストにつき、蒸気発生器の大型化に伴う製造コスト増分と、蓄熱材である SUS304 の材料費(2.129 \$/kg、2017年6月市場価格[132])を合計することで算出する。蒸気発生器の大型化に伴う製造コスト増分については、製造コストは体積の 0.6 乗に比例して増加するという経験則[133]に基づいて計算を行った。ここで元となる U 字蒸気発生器の製造コストとしては、カリフォルニア州 San Onofre 原発における蒸気発生器交換プログラム(SGRP)に際して公開された試算(2013)[134]に記載の 3 号機における U 字蒸気発生器の製造契約金額である 27.97 M\$/Unit を用いた。

本条件での試算の結果、蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の製造コストは、1 機あたり大型化に伴う製造コスト増が 53.15 M\$、蓄熱材の材料コストが 4.41 M\$と算出された。従って主蒸気系を 4 ループ持つ核融合発電所における想定製造コスト増分は計 230.24 M\$となる。

これは、おおよそ  $10^{10}$  \$ のオーダーと一般に考えられている核融合発電所全体の建設費と比して見た場合、建設のために必要となる受容性を満たすためのコストとしては許容できる額であると考えられる。従って経済的にも実現性はあるものと評価することができる。

加えて、先行研究においてパルス炉向けに提案されている溶融塩 IHX は、ホットタンクに貯蔵する高温溶融塩だけで  $9.0 \times 10^6$  kg の質量が必要であると報告されている[85]。これは蓄熱材充填 U 字蒸気発生器が備える SUS304 の質量である  $8.28 \times 10^6$  kg (4 機合計) と同程度であるが、蓄熱材 IHX は中間熱交換ループとして大掛かりな設備が必要であり、必要コストは蓄熱材充填 U 字蒸気発生器よりも大幅に上となることが予測される。従って従来提案されている装置との比較の点からも、蓄熱材充填 U 字蒸気発生器には経済的優位性があると考えられる。

### 6.4.2 蓄電装置導入の実現性

#### 6.4.2.1 技術的実現性

1,200 MW の核融合発電所を Table 5-5 において示された 2040 年東日本系統を模した電力系統に導入する場合に必要な蓄電装置について Eq. 6-1 を用いて推計すると、設置すべき蓄電装置の出力—容量は 635.6 MW – 105.9 MWh となる。ここで、この推計された必要出力—容量を現在市場において実用化されている蓄電装置の諸元と比較して示したものが Figure 6-16 である。Figure 6-16 は横軸に容量[Wh]、縦軸に出力[W]をとり、現在利用されている各蓄電装置の大まかな性能をまとめたものである(ただし点線は現在構想中の蓄電装置を表す)<sup>21</sup>。その上に、赤線によって核融合発電所の緩和のために必要と推計される蓄電装置の性能である 635.6 MW – 105.9 MWh を重ねて示している。

---

<sup>21</sup> 図中の略号は以下の通りである。EES: Electrical Energy Storage、PHS: Pumped Hydro Storage、CAES: Compressed Air Energy Storage、SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage、KID: Kaiyo Inverse Dam.

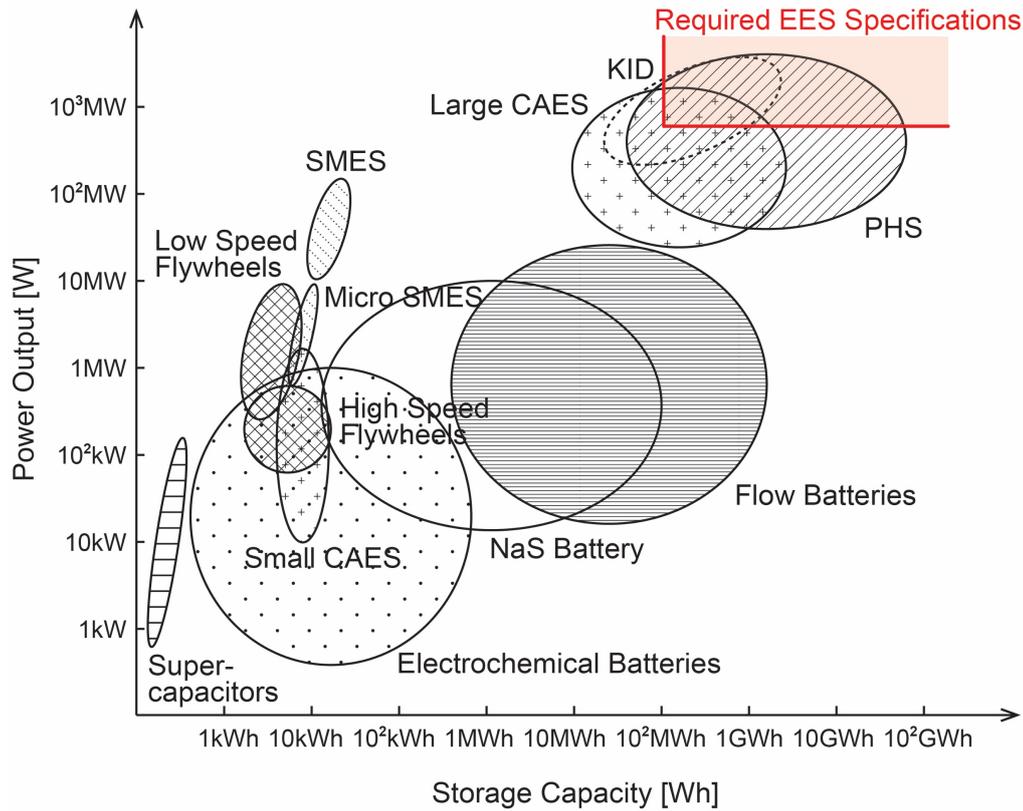


Figure 6-16 Comparison of Capacity and Output of Electrical Energy Storages [135, 136].

Figure 6-16 は、現在実用化されている蓄電装置のうち、核融合発電所における緩和用途にそのまま用いることができるのは揚水発電並びに大規模圧縮空気エネルギー貯蔵のみであることを示唆している<sup>22</sup>。従って核融合発電所の導入先電力系統に予めこれらの蓄電装置が常時発電可能な状態で接続されている場合、これを即時解列時の影響緩和のための蓄電装置として用いることが可能である。しかしながら、これらの大規模蓄電装置を備えている電力系統は多くなく、かつ将来の再生可能エネルギーの導入が進んだ系統においては揚水発電等の大規模蓄電設備は積極的に活用されることが予測され、これを核融合発電所のプラズマディスラプション対応のためのバックアップとして用いることの実現性は高くない。

一方、未だ市場においては実用化されていない規模ではあるものの、NaS 電池やリチウムイオン電池といった二次電池はセルの数を増やすことにより大規模化が可

<sup>22</sup> 石川(2014)によって考案され、筆者らによって研究が進められている海洋インバースダム(KID)についても、実用化された場合には緩和装置として用い得ることが示唆されている。137. 石川容平, 発電システムおよび発電方法(特開 2014-51970). 2014: 日本国特許庁.

能であり、出力についても必要に応じて設計することが可能である。技術的には核融合発電所の緩和装置として必要となる数百 MWh 規模の二次電池を建設することも十分可能であると考えられており[138]、従って二次電池を用いた緩和装置の建設には技術的実現性があると評価することができる。

### 6.4.2.2 経済的実現性

核融合発電所の建設に際し新たに蓄電装置として二次電池を設置する場合につき、二次電池として NaS 電池を用いることを想定の上で必要となる建設コストを試算する。NaS 電池の建設コストについては Poonpun ら(2008)の試算[139]並びに Oudalov ら(2006)の試算[140]に示された手法として、Balance of Plant コストは無視し、容量あたりコストとして 1,758 \$/kWh のみを用いることで算出する。結果、635.6 MW – 105.9 MWh の性能を持つ NaS 電池の建設コストは 186.17 M\$と試算された。

これは 6.4.1.2 節において試算された蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の建設コストである 230.24 M\$よりも 2 割程度低い数値であり、従って蓄電装置についても、核融合発電所全体の建設費と比して見た場合には建設のために必要となる受容性を満たすためのコストとしては許容できる額であると言える。よって蓄電装置による緩和は、経済的実現性を持つと評することが出来る。

## 6.5 結言

第 5 章の結果は、プラズマディスラプションに起因する即時解列にかかる電力系統周波数への影響が改善されないならば、核融合発電所は導入先電力系統における受容性を満たすことが出来ず、導入が制約される可能性を示している。5.4.3 節の解析では将来の日本における核融合発電所導入さえも制約される可能性を示しており、本制約は将来の核融合発電所の導入に際し少なからざる影響を与えるものであると考えられる。

従って本章では、第 5 章で指摘された電力系統への悪影響を緩和し、核融合発電所の電力系統受容性を向上させる手法につき 2 手法を提案し、その有効性並びに実現性にかかる検討を実施した。

## 第6章 核融合発電所運用にかかる電力系統過渡安定度改善手法の検討

第一に提案する緩和手法は、発電システム内に熱浴を設けることで冷却材温度低下速度を緩和する手法である。この目的のため「蓄熱材充填 U 字蒸気発生器」の概念設計を実施し、この有効性を第4章にて構築されたシミュレーションモデルを用いて評価した。結果は、半径拡張 2 m の条件において汽水分離器における溢水を 900 sec の間回避し、プラズマディスラプション時においても発電を継続できることを示した。また、本緩和手法について技術的・経済的両面から実現性があることを論じた。

第二に提案する緩和手法は核融合発電システム外に蓄電装置を接続し、プラズマディスラプション時に失われる出力を電氣的に緩和する手法である。本手法の有効性については第5章にて構築されたモデルを用いて評価し、結果 Eq. 6-1 において推計される適切な諸元の蓄電装置を導入することにより周波数偏差を 0.2 Hz 以内に抑えられることを確認した。また、本蓄電装置についても同様に技術的・経済的実現性が満たされていることを論じた。

提案された2手法はどちらも本研究が初出である。本章で実施されたのは簡易モデルによる検証であり、実際の導入に向けた設計にあたってはより詳細な検討が必要であるという課題が存在するものの、両手法ともにその有用性並びに実現性が示されたことから、これらの緩和装置により核融合発電所の導入可能市場が大きく拡大する可能性があると考えられる。

本章には、出版社の規約並びに許諾に基づき、筆者らによる以下の発表文献を再構成した内容が含まれている。[31] Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Small-Scale Electrical Grids*. Fusion Science and Technology, 2017. 68(2): p. 341-345. This is an Accepted Manuscript of an article published by Taylor & Francis in Fusion Science and Technology on 20 Mar 2017, available online: <http://www.tandfonline.com/10.13182/FST15-106> [129] Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Requirements for DEMO from the Aspect of Mitigation of Adverse Effects on the Electrical Grid*. Plasma and Fusion Research, 2015. 10: p. 1205070-1205070.

# 7 核融合発電所の自由化電力市場 への経済的導入戦略

## 7.1 導入

### 7.1.1 核融合発電所の将来導入戦略

従来、核融合発電所の導入戦略を論じるにあたっては一般に、過去のトレンドの未来への外挿が行われてきた。特に参照されてきたのは歴史上における軽水炉の市場への導入トレンドであり、プラズマディスラプションを含む緊急停止頻度の目標値 0.5 事象/年[76]など、戦略上重要な多くのパラメータが本手法により定められてきた。これらの導入戦略立案手法は本質的に、発電源である核融合発電所の性質と、その導入先である電力市場の双方について、過去からの連続性を仮定していると言える。

しかしながら本論文においてここまで筆者は、核融合発電所にはプラズマディスラプション発生時における電力系統過渡安定度への影響という新たな制約が存在することを示し、導入のためには特別な緩和手段が必要であることを示した。さらに電力市場は現在世界的に不連続な変革期にあり、核融合発電所が導入される将来電力市場は、過去に軽水炉が導入された電力市場とは異なる性質を備えていることを併せて示した。従って過去に実行された核融合発電所の導入戦略に関する議論には、既に無効な論拠に基づくものが多数存在する可能性があると考えられ、将来の核融合発電所の電力市場への導入戦略につき新たな考察が必要である。

よって本論文において最後に論じるのは、本研究によって明らかになったプラズマディスラプションに起因する即時解列の存在、並びに緩和装置の必要性が、将来の電力市場への核融合発電所導入の戦略に如何なる影響を与えるかである。

### 7.1.2 将来電力市場における核融合発電所

将来電力市場における核融合発電所の運用にあたっては、発電した電力について大きく次の2つのケースでの販売が考えられる。

7.1.2.1 固定価格買い取り

1つ目は、核融合発電所が長期間に渡って、kWh あたり一定の単価で売電するケースである。これは、次のような場合に実現される。1) 従来の電力系統における売電方法と同様、相対かつ長期の契約で電力を売電する場合。2) 近年では英国が原子力発電所に対して実施したように、差額調整契約制度(CfD: Contract for Difference)等の制度が核融合発電所に対して適用された場合。

1) については、今後も発展途上国においては電力自由化が進まない国が一定数存在すると考えられ、こういった国々においては将来においても本ケースが成立する可能性がある。さらに、自由化された電力市場においても、相対取引を許容する市場も存在する。2) については、特に外部からの援助により大規模電源を建設する際、事業者のリスクを軽減する目的で導入されるケースが散見され、将来においても先進国・発展途上国の双方において成立する可能性がある。特に核融合発電所のような新技術の導入にあたっては、初期のプラントについて、類似制度が適用される可能性は高いと考えられる。

本ケースにおいては、核融合発電所の経済性は発電単価 (Levelised Cost of Electricity: LCOE) で論じられる。割引率を考慮した発電単価(LCOE)は Eq. 7-1 において計算される[141]。

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{j \in \text{建設期間}} C_{cj}(1+r)^j + \sum_{i \in \text{運転期間}} (C_{OMi} + C_{SRCi} + C_{Fi}) / (1+r)^i}{\sum_{i \in \text{運転期間}} (P_e f_{avi} \times 8760 / (1+r)^i)} \quad (\text{Eq. 7-1})$$

Eq. 7-1 において  $C_{cj}$  は  $j$  年における建設費支出、 $C_{OMi}$ ,  $C_{SRCi}$ ,  $C_{Fi}$  はそれぞれ  $i$  年における運転維持コスト、定期交換コスト、燃料コストを表している。また、 $P_e$  は電気出力、 $f_{avi}$  は  $i$  年における設備利用率、 $r$  は割引率を表す[141]。即ち Eq. 7-1 は発電所のライフサイクルにおける発電コストを発電量で除し、現在試算価値に変換したものであり、発電量あたりの発電コストと解釈できる。

即ち、固定価格買い取りケースにおいては、核融合発電所の経済性は、LCOE と電力買取価格のみにより議論をすることが可能である。

7.1.2.2 自由化電力市場

2つ目の考えられるケースは、核融合発電所が、自由化された電力市場において市場メカニズムのもとで事業を行わねばならないケースである<sup>23</sup>。

自由化電力市場において発電事業者は、発電した電力を原則として市場を通じて売却せねばならない<sup>24</sup>。自由化された電力市場は一般に市場安定化と競争原理を両立させるために非常に複雑なマーケットメカニズムを有しており、これらを構成する市場の一部を例示したものが Figure 7-1 である [28]。

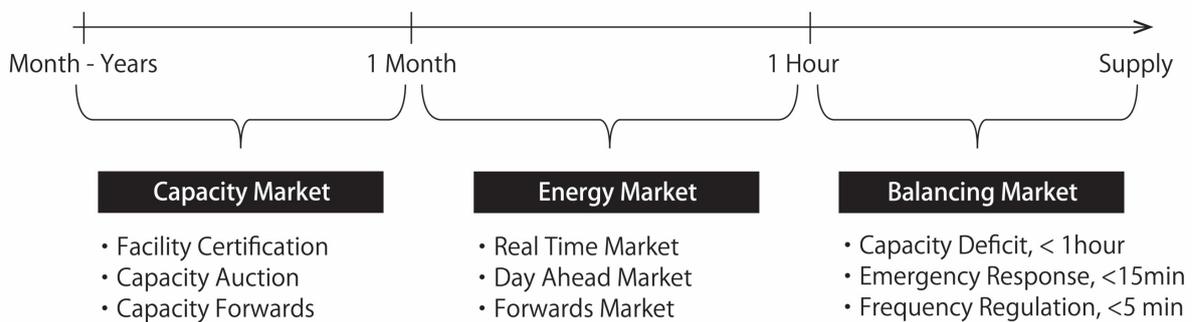


Figure 7-1 Illustration of Deregulated Electricity Market Mechanisms [28].

Figure 7-1 は、事業者が発電事業を行うにあたり、実需要までの時間によって分類される様々な市場への入札を通じて収入を得る必要があることを示している。最も一般的な取引は実需要の前日～1時間前における入札を通じ、発電した電気を売電市場 (Energy Market) において Wh あたりの単価で販売する取引である。しかしながら、発電所が完成するより前に発電容量を容量市場 (Capacity Market) において W あたりの単価として入札し、発電所建設に必要なコストを先行的に得るメカニズムが存在する市場も多い。さらに、負荷に素早く追従できる発電能力を用いて周波数の安定化を行うサービスを売買するアンシラリーサービス市場 (Balancing Market)

<sup>23</sup> 本論文においては、電力卸市場・調整市場が整備され、発電事業者が電力市場を通して小売事業者に電力を売却しなければならない状態を指して自由化電力市場としている。即ち発電側における自由化について論じており、小売の自由化による影響については本論文においては議論しない。(核融合による電気に消費者がプレミアムを払うケースなど。)

<sup>24</sup> 発電全量のマーケットにおける売却を義務付けている市場 (全面プール型) もあれば、市場を介さない取引を認めている市場も存在する。

も多くの自由化市場に存在する。アンシラリーサービス市場においては追従性の高い電源ほど高い価格づけがなされる場合も多いことから、本市場は発電所の W/s の能力を現金化していると考えられることも可能である。

これにより発電事業者は自由化電力市場において、保有する発電所というアセットを容量市場・エネルギー市場・balancing市場といった各種市場を通じて最大限にマネタイズする観点から発電事業に臨む必要が生じる。このことは、換言すれば発電する電力の Wh あたりの価値のみならず、W の価値、さらには W/s の価値についても考慮する必要があることを意味する。

自由化された殆どの市場において既に各発電会社はこのケースのもとで事業を行っており、核融合発電所もいずれ同様に運用されると考えるのが自然である。従って、このケースにおける経済性こそが、核融合発電所の本当の将来市場価値を表していると考えられる。

### 7.1.3 本章の目的

本章では、本論文でこれまで論じてきたプラズマディスラプションに起因する即時解列並びにその緩和装置の必要性を考慮した上、将来において主流になると考えられる自由化電力市場における核融合発電所の経済性について定量的に分析を行う。本分析により、将来の核融合発電所の電力市場への導入戦略につき新たな角度から考察を加え、より経済的に最適な導入戦略を示すことで核融合発電所の経済的合理性を高めることとする。ここで核融合発電所の経済性とは核融合発電事業を行う事業者単体の収益を指すものの、これを最適化することは社会への低エントロピーエネルギー源の市場原理に基づく合理的な導入促進に繋がるものであり、社会の総余剰を最大化することにも繋がるものである。

### 7.1.4 先行研究

核融合発電の発電単価については70年代より盛んに研究が為されてきた。特に初期の重要な成果としてはSheffieldら(1986)[142]、Deleneら(1988)[143]によって開発されたトカマク炉を対象とした経済性評価手法である Generomak model (Generic Magnetic Fusion Reactor model) がある。Generomak model は当時の設計研究をもとに開発されたトカマク炉システムコードであり、簡易モデルであるものの、核融合炉から周辺プラントまでを含む核融合発電所全体のコストの解析を可

能とした[144]。さらに、Generomak モデルをもとに日本の軽水炉発電の見地等を盛り込み発展させたシステムコードが Yoshida ら(1994)[145]、Hiwatari ら(2003)[146]によって開発されている。

これらの知見に基づいた核融合発電所の LCOE の試算に関しては多くの数値が存在し、一例として時松ら(2002)はこれを 0.051 から 0.068 \$/kWh と試算している[147]。これは、我が国においては軽水炉 (0.062 \$/kWh) と同程度のコストであり、大規模太陽光 (0.181 \$/kWh) を大きく下回った数値である[148]。

しかしながら、先行研究における核融合発電所の経済性試算は全て発電単価(LCOE)を推計するものであり、自由化電力市場のメカニズムを考慮に入れた経済性試算は現在のところ実施されていない。

## 7.2 方法

### 7.2.1 簡易化 PJM 市場モデル

先述の理由から、固定電力価格を仮定した経済性試算（即ち LCOE を用いた経済性試算）は将来の電力市場における試算としては十分でない可能性がある。従って本章においては、自由化された電力市場を仮定した上でそのモデル化を実施し、これを用いて核融合発電所の経済性試算を行う。ここで自由化電力市場とは、2.2.2.1 節に記述の通り、発電事業者から見て、電力卸市場・調整市場が整備され、市場を通じて電力を販売する状況を指している。

そこで、米国における RTO である PJM<sup>25</sup>につき実マーケットデータを基にモデル化を実施することで簡易 PJM 市場モデルを構築する。対象として PJM を選択したのは PJM が全面プール型市場を採用し、かつ広くマーケットデータを公開しているために、自由化市場の研究対象として適していると考えられるためである。

---

<sup>25</sup> ペンシルバニア州・ニュージャージー州・メリーランド州の3電力会社が設立した Interconnection であり、現在ではデラウェア州・バージニア州・ワシントン D.C. を含み、人口 2,300 万人をカバーしている。

簡易 PJM 市場モデルにおいては PJM が包括するマーケットメカニズムのうち、電力卸市場(リアルタイム市場、前日市場、先渡し契約)、インバランス料金、並びにアンシラリーサービス市場のモデル化を行う<sup>26</sup>。

### 7.2.1.1 電力卸市場モデル

#### 7.2.1.1.1 前日市場・リアルタイム市場モデル

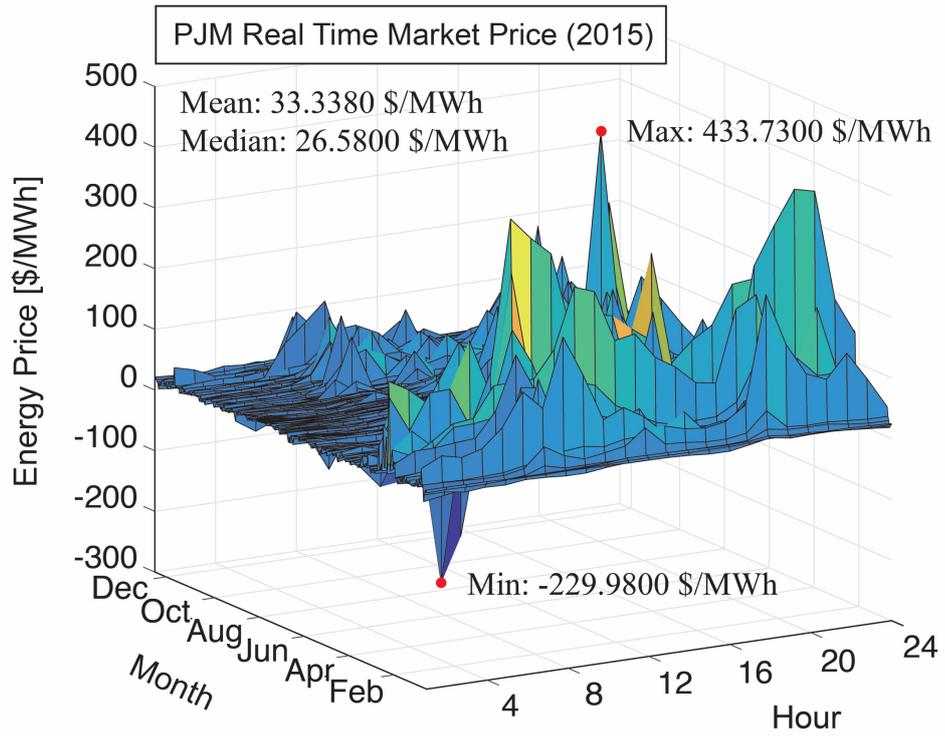
PJM における電力卸市場 (Energy Market) には前日市場 (Day-Ahead Market) とリアルタイム市場 (Real-time Balancing Market) の2種類が存在する。前日市場は、前日までに各事業者により提出されたオファー・需要入札に基づき計算された1時間単位の決済価格に基づいて、電力の決済を行う市場である。一方リアルタイム市場においては、実需給に基づき5分ごとに決済価格が計算され、提出された発電・受電計画と実需給の差分につき1時間単位で決済が実行される[151]。

PJM では決済価格は Locational Marginal Prices (LMPs) と呼ばれるメカニズムにより地域ごとに設定される。これは、各地点 (node) において送電線に混雑が発生した場合、混雑費用を地点ごとの電力の市場価格に反映させるメカニズムである。このメカニズムにより、混雑回避のため高い発電コストの電源を運用することにインセンティブが生じ、市場原理に基づく送電線混雑回避を可能としている[151]。

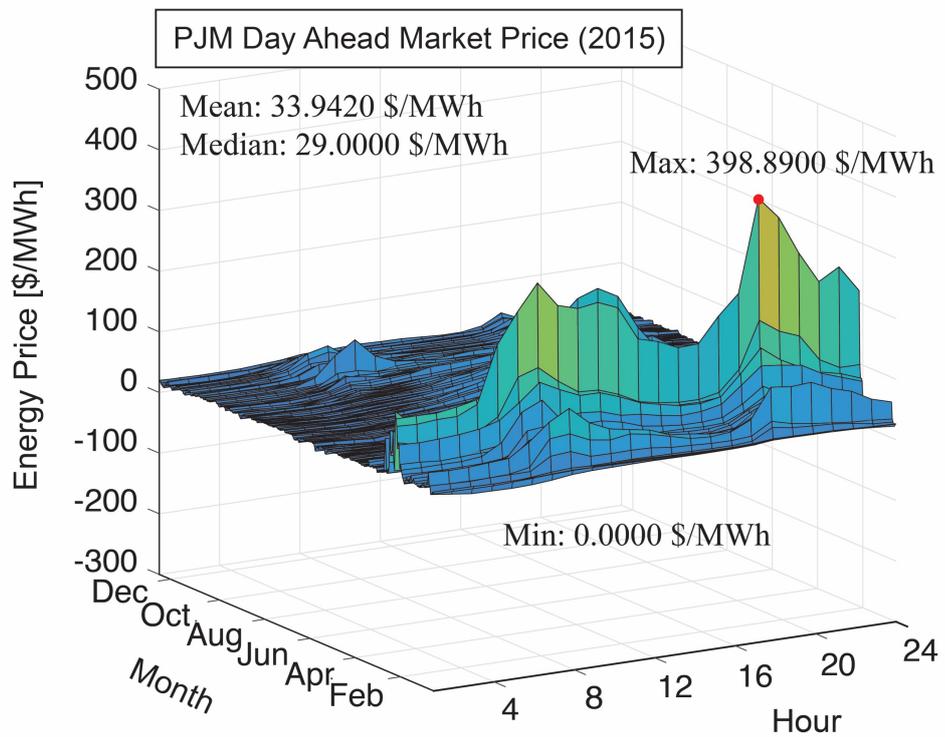
本研究で構築する簡易化 PJM 市場モデルでは、電力卸市場における売電価格として、PJM における 2011 年 1 月から 2015 年 12 月までの 5 年分の実 LMP データ[152]を抽出して利用した。ただし、核融合発電所については立地を仮定せず、PJM 市場全体における加重平均 (node = 1, PJM node) における LMP をマーケットデータとして計算を実施した。抽出した実 LMP データのうち、2015 年におけるリアルタイム市場決済価格を Figure 7-2 (a) に、前日市場決済価格を Figure 7-2 (b) に示す。Figure 7-2 においては z 軸(高さ方向)に市場における成約価格 (MWh あたり電力価格) をとり、一年を通じた価格の変動を1時間刻みで示したものである。

---

<sup>26</sup> 他に重要な市場として容量市場 (Capacity Market) 、金融的送電権市場 (Financial Transmission Rights) が存在するが、本簡易モデルにおいては考慮しないこととした。149. *PJM Manual 06: Financial Transmission Rights, Revision: 19*. 2017, PJM: Audubon, 150. *PJM Manual 18: PJM Capacity Market, Revision: 38*. 2017, PJM: Audubon.



(a) Real Time Market



(b) Day Ahead Market

Figure 7-2 PJM LMP Historical Data of Energy Market (PJM Node), 2015 [152].

Figure 7-2 はリアルタイム市場における電力価格は前日市場と比して不規則な値動きが多く、かつ電力価格が負の値となっている時間帯が多数存在することを示している。また平均値・中央値で見た場合でも、リアルタイム市場は前日市場より電力価格が低い。

本モデルのもと、前日市場並びにリアルタイム市場における年あたり核融合発電所の売電収入は Eq. 7-2 により計算を行った。即ち、市場電力価格は核融合発電所の市場への参入によって変化しない仮定を置き、単純に市場価格に発電量を乗じた金額を売電収入としている。

$$\text{Energy Revenue } [\$/\text{year}] = \sum_{\text{hour}} \text{LMP Data} \times W_{\text{SE}} \quad (\text{Eq. 7-2})$$

$W_{\text{SE}}$ : 送電端発電量 [MWh]

#### 7.2.1.1.2 先渡し取引モデル

PJM に存在する電力卸市場は前日市場とリアルタイム市場のみであり、電力の先渡し取引市場は存在しない。しかしながら、PJM は全面プール型市場である一方で、PJM に参加する発電事業者と小売事業者が2者間で金融的に相対取引契約を結ぶことを妨げない。この場合においても、発電事業者は全発電量を電力卸市場に卸し、また小売事業者も全量を電力卸市場から購入する。電力取引が終わった後に、先渡し契約における価格と市場価格との差異を2社間で市場を介さず決済することで、金融的に、先渡し取引が成立する[153, 154]。先渡し取引は2者間の契約であり、市場を介さないため、公開された価格データはほぼ存在しない。しかしながら、ニューヨーク・マーカンタイル取引所には PJM 電力の先物銘柄が数多く上場しており、適切な市場原理のもとでは、適切な割引率のもとで先渡し相対取引における電力契約価格とこれら商品先物取引所における銘柄価格は理論上一致する[155]。

従って本簡易化 PJM 市場モデルでは、先渡しでの長期相対での売電シナリオとして毎年 12 月 31 日に翌年 1 年間分の長期先渡し売電契約を結ぶ仮定のもと、PJM Western Hub Real-Time Peak Calendar-Month 2.5 MW Futures (Code: JM)並びに PJM Off-Peak Calendar-Month LMP Futures (Code: JP)の2銘柄における 2010 年から 2014 年の 12 月 30 日における終値を EODData 社から取得[156, 157]することで、これを先渡し相対取引価格とする。Figure 7-3 並びに Table 7-1 に得られた結果を示す。

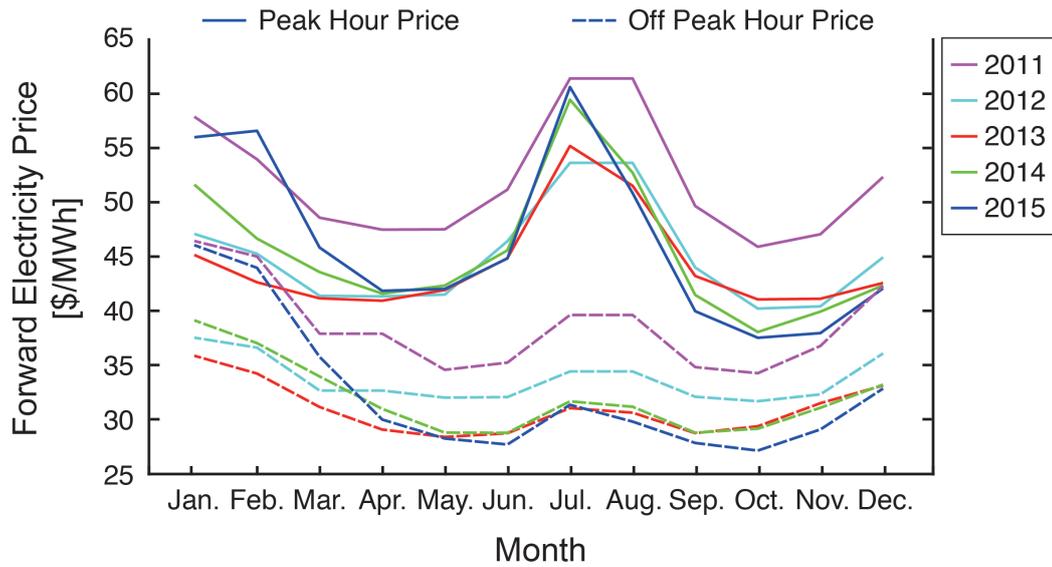


Figure 7-3 Year-Forward PJM Electricity Price Trends [156, 157].

Table 7-1 Year-Forward PJM Electricity Forward Prices [\$/MWh] [156, 157].

Month	Hours	2011	2012	2013	2014	2015
Jan.	Peak	57.78	47.03	45.1	51.55	55.9
	Off-Peak	46.38	37.51	35.85	39.1	46.0
Feb.	Peak	53.88	45.21	42.59	46.6	56.49
	Off-Peak	44.96	36.6	34.22	37.01	43.92
Mar.	Peak	48.52	41.35	41.12	43.53	45.78
	Off-Peak	37.88	32.66	31.15	33.95	35.75
Apr.	Peak	47.42	41.3	40.9	41.55	41.81
	Off-Peak	37.88	32.66	29.08	30.98	30.0
May	Peak	47.45	41.46	41.88	42.29	41.98
	Off-Peak	34.56	32.01	28.4	28.8	28.26
Jun.	Peak	51.09	46.36	44.8	45.52	44.78
	Off-Peak	35.22	32.06	28.74	28.78	27.71
Jul.	Peak	61.29	53.55	55.1	59.34	60.5
	Off-Peak	39.59	34.41	31.05	31.67	31.35
Aug.	Peak	61.29	53.55	51.45	52.65	50.78
	Off-Peak	39.59	34.41	30.63	31.17	29.81
Sep.	Peak	49.59	43.95	43.17	41.43	39.94
	Off-Peak	34.81	32.09	28.75	28.79	27.85
Oct.	Peak	45.85	40.18	41.02	38.03	37.5
	Off-Peak	34.25	31.68	29.38	29.16	27.15
Nov.	Peak	47.0	40.38	41.08	39.9	37.93
	Off-Peak	36.75	32.31	31.5	31.08	29.09
Dec.	Peak	52.25	44.88	42.53	42.3	42.03
	Off-Peak	42.25	36.06	33.12	33.2	32.84

Figure 7-3 並びに Table 7-1 は1月から12月までの先物市場における Peak Hours 並びに Off-Peak Hours の電力価格を\$/MWh として示したものである。ここで Peak Hours は月曜から金曜日の8-23時台と定義されており、Off-Peak Hour とはそれ以外の時間帯を指す<sup>27</sup>。

本モデルにおける核融合発電所の売電収入は Eq. 7-3 により計算される。即ち、ここにおいても市場電力価格は核融合発電所の参入によって変化しない仮定が置かれている。

$$\text{Energy Revenue } [\$/\text{year}] = \sum_{\text{hour}} \text{NYMEX:JO Data} \times W_{\text{SE}} \quad (\text{Eq. 7-3})$$

$W_{\text{SE}}$ : 送電端発電量 [MWh]

### 7.2.1.2 インバランス料金

約定発電量と実際の送電量の差異をインバランスと呼び、自由化電力市場においては一定以上のインバランス分の電力に対してはインバランス料金と呼ばれるペナルティが課せられるのが一般的である。

PJM では変動範囲が±1.5%以内の場合、インバランス料金としては基本的にリアルタイム市場における LMP が適用される。即ち、過不足分についてはマーケットにおいて決済がなされ、特段のペナルティは発生しない。しかしながら、変動範囲が±1.5%を超過した場合、LMP をベースに補給価格または余剰買取価格が別に計算され、インバランス料金にペナルティの要素が加わる[158]。

ここで、PJM における LMP をベースとした実際の補給価格の決定方法は煩雑であるため、本モデルでは資源エネルギー庁(2007)による試算[159]を基に簡易化を行い、Eq. 7-4 においてこれを計算する。

$$\text{Imbalance Fee } [\$/\text{year}] = \sum_{\text{hour}} \max(\text{Real Time LMP} \times 2.23, 100) \times (W_C - W_{\text{SE}}) \quad (\text{Eq. 7-4})$$

$W_C$ : 計画発電量 [MWh],  $W_{\text{SE}}$ : 送電端発電量 [MWh]

<sup>27</sup> 厳密には、National Holiday など定められた休日は曜日に関わらず終日 Off-Peak として扱われるが、本モデルではこれを考慮しない。

### 7.2.1.3 アンシラリーサービスモデル

アンシラリーサービスとは、電力系統の需給のバランスを調整し、系統周波数を一定に保つサービスのことである。電力そのものの供給（プライマリーサービス）と対比する意味合いで、補助的（アンシラリー）サービスと呼ばれている[160]。

アンシラリーサービスの提供のため、PJM には瞬動予備力調達市場・周波数調整市場など複数の市場メカニズムが設けられている。アンシラリーサービスに関わるメカニズムは非常に複雑であり、さらに FERC Order 755<sup>28</sup>の発令によって、価格の決定は一層複雑さを増している。加えて、本アンシラリーサービスは需要・メカニズム共にダイナミックに成長している途上の市場であり、現在のシステムを詳細にモデル化することは、将来における電力系統の再現に寄与するものではないと考えられる。

従って、本研究においては、新谷(2013)により実施された推計[160]をベースにアンシラリーサービスコストを Eq. 7-5 として大幅に簡易化した上で、RMCP (Regulation Market Clearing Price / 周波数調整単価)を 2 \$/MWh から 200 \$/MWh まで変化させ、感度分析を実施することとする。これは 2012 年における年間加重平均 RMCP = 20.35 \$/MWh[160]のおおよそ 10 倍から 1/10 倍までの範囲である。このような広い範囲で感度分析を実施するのは、今後さらなる再生可能エネルギーの導入により周波数調整市場の需要が大幅に伸びると予測される一方で、電気自動車や家庭用燃料電池の普及により供給も大幅に伸びると予測され、市場における単価の動向の予測が難しいためである。単純化のため、Millage については常に 30%を仮定する。

$$\text{Ancillary Service Cost [$/year]} = \sum_{\text{hour}} \text{RMCP} \times W_{\text{output}} \times 30\% \quad (\text{Eq. 7-5})$$

RMCP: Regulation Market Clearing Price [\$/MWh],  $W_{\text{output}}$ : 予備力供給能力 [MW]

<sup>28</sup> フライホイールやバッテリー等に対してはより高い価格付けを行うことを義務付けた 2011 年 FERC(連邦エネルギー規制委員会)発令の規則。

## 7.2.2 核融合発電所運用シナリオ

### 7.2.2.1 運用シナリオ

核融合発電所については、本論文における議論を踏まえ、Table 7-2 並びに Table 7-3 に示すシナリオを仮定する。運用は定常運転とし、第4章の結果を踏まえ送電端出力は 1,200 MW、熱出力 2,801 MW とする。送電した電力については、リアルタイム市場・前日市場・長期相対取引のそれぞれで販売した場合を比較する。プラズマディスラプションの頻度については、0.001 – 0.00001 times/hour の範囲で感度分析を実施する<sup>29</sup>。プラズマディスラプション発生時におけるプラズマ再立ち上げまでの所要時間は 10 日間と仮定する。

また、電力系統への導入にあたっては緩和装置が必要であると仮定し、East System2040 の電力系統を仮定した上、用いる緩和装置として 1) 蓄熱装置を導入した場合、2) 所内に NaS 電池を設置した場合、3) 緊急時出力をアンシラリーサービス市場を通じ外部調達した場合の 3 シナリオについて比較を実施する。

Table 7-2 Fusion Power Plant Operation Scenarios.

System Parameter	Value
Operation Mode	Steady-state
Electricity Output (sending-end)	1,200 GW
– Major Radius	7.728 m
– Minor Radius	2.208 m
– Beta Value	4.274
– Fusion Output	2,801 MW
Frequency of Plasma Disruption (and other interruptions)	0.001 – 0.00001 hour <sup>-1</sup>
Service Time before Plasma Restart	10 days
Scheduled Maintenance (incl. replacements)	61 days (Nov. & Dec.) / 2 years
Bidding Market	Real-time or Day-ahead or Year-Forward

<sup>29</sup> これはおよそ 8.4 回／年から 0.0084 回／年に相当する頻度である。

Table 7-3 Required Mitigation Device Specifications.

System Parameter	Value
Power System	East System 2040
– Grid Size	75 GW
– Grid Characteristic Factor	0.692
1) Required Heat Storage Extra Radius	2 m each
– Heat Storage Material	2,071,900 kg/Unit
2) Required NaS Battery Output	635.6 MW
– NaS Battery Capacity	105.9 MWh
3) Required Ancillary Service Output	635.6 MW
– Duration	15 min

## 7.2.2.2 設備コスト

### 7.2.2.2.1 核融合発電所コスト

核融合発電所の設備価格並びにメンテナンスコストについては、電中研において開発されたシステムコードである FUSAC[146]により計算を実施する<sup>30</sup>。得られた試算結果を Table 7-4 に示す。

<sup>30</sup> FUSAC は 80 年代に公開されたシステムコードである Generomak に基づき建設コストを試算しており、最新の推計と比して建設費を低く見積もっていることに留意する必要がある。現在、核融合科学研究所・後藤ら、量子科学技術研究開発機構・日渡らによって最新の見地を取り入れた経済性並びにシステムコードの検討が進められており、Table 7-4 の結果については将来的に改めて再評価が必要であると考えられる。142. Sheffield, J., et al., *Cost assessment of a generic magnetic fusion reactor*. Fusion Technology, 1986. 9(2): p. 199-249, 143. Delene, J., et al., *Generomak: Fusion physics, engineering and costing model*. 1988, Oak Ridge National Lab.: Tennessee. 144. Goto, T., 2. *Find the Design Point of Fusion Reactors*. Journal of Plasma Fusion Research, 2016. 92(8): p. 558-592, 161. Hiwatari, R., 1. *Overview of Fusion Reactor Conceptual Design Supported by Design Tools*. Ibid.: p. 585-587.

Table 7-4 Estimated Nuclear Fusion Power Plant Cost.

(a) Construction Cost	
	Cost
Direct Construction Cost	2,968 M\$
<i>Fusion Island</i>	<i>(1,677 M\$)</i>
<i>Balance of Plant</i>	<i>(918 M\$)</i>
Indirect Construction Cost	148 M\$
Others	312 M\$
<b>Total Construction Cost</b>	<b>3,428 M\$</b>

(b) Operation and Maintenance Cost	
	Cost
O&M Cost (incl. replacement)	236 M\$/year
Fuel Cost	0.22 M\$/year
<b>Total O&amp;M Cost</b>	<b>236.22 M\$/year</b>

#### 7.2.2.2.2 蓄熱材充填 U 字蒸気発生器コスト

蓄熱材充填 U 字蒸気発生器の建設コストについては 6.4.1.2 節における試算を利用し、運転・保守管理費については従来の蒸気発生器と同等と仮定し増加分は無いものとする。Table 7-5 に 6.4.1.2 節における試算を再掲する。

Table 7-5 Estimated Heat Storage-filled Steam Generator Cost.

	Cost
Construction Cost (Increment)	53.15 M\$/Unit
SUS 304 Material Cost	4.41 M\$/Unit
<b>Total Construction Cost (Increment)</b>	<b>57.56 M\$/Unit</b>

#### 7.2.2.2.3 NaS 電池コスト

発電所内に設置する NaS 電池の建設コストについては 6.4.2.2 節における試算を利用する。年間運転・保守管理費については 10 \$/kW とする。これに加え、NaS 電池は 4,500 回の充放電サイクルで 90% の性能を保つとされるため [162]、一日数サイクルの充放電が見込まれる本試算においては 2 年に 1 回の定期点検時に、併せて NaS

電池も全交換を実施することと仮定する。得られた NaS 電池の試算結果を Table 7-6 に示す。

Table 7-6 Estimated NaS Battery Cost.

	Cost
Total Construction Cost	186.17 M\$
Total O&M Cost (incl. replacement)	94.15 M\$/year

### 7.2.3 経済性試算手法

本研究においては、7.2.1 節、7.2.2 節において設定したモデルのもと、核融合発電所が 40 年間自由化電力市場で運用された場合のライフサイクルコスト並びに収入を試算する。

核融合発電所の売電収入・インバランス料金等の試算にあたっては、核融合発電所がどのタイミング・どの頻度でプラズマディスラプションに起因する即時解列を起こすかが大きく影響を与える。さらに、年によっても電力市場の動向は異なる。そこで本研究では、2011 年から 2015 年までのそれぞれの年につき、モンテカルロ法にてプラズマディスラプションを発生させ 25,000 回(25,000 年分)の試算を実施し、計 125,000 回(125,000 年分)の試算の平均により核融合発電所の平均キャッシュフローを計算する。割引率は 1.7%<sup>31</sup>とし、建設費並びに 40 年間の平均キャッシュフローを NPV (現在試算価値: Net Present Value) に換算することで、ライフサイクルでの経済性を試算する。

## 7.3 結果

### 7.3.1 ライフサイクルコスト

本条件における、核融合発電所並びに緩和装置の建設並びに保守運用（交換費を含む）にかかるライフサイクルコストは Table 7-7 の通りであった。核融合発電所本

<sup>31</sup> 独立行政法人国際協力機構(JICA)の定める「中進国以上／一般条件／固定金利・／基準（アンタイド融資）」における値。163.円借款供与条件表（平成 29 年 10 月 16 日以降に事前通報を行う案件に適用）。2017, JICA: Tokyo.

体と比較した緩和装置のライフサイクルコストは、蓄熱材充填 U 字蒸気発生器で本体比 0.6%、NaS 電池で本体比 23.3%であった。

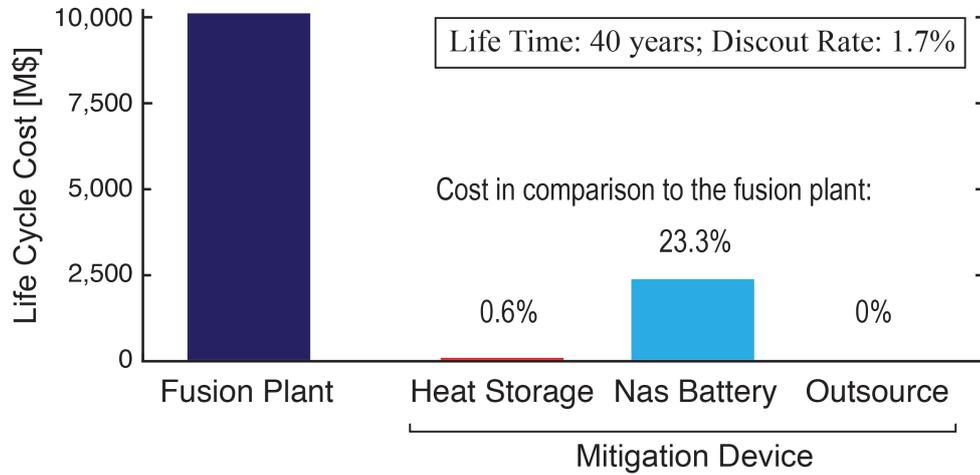


Figure 7-4 Comparison of the Life Cycle Cost of Mitigation Devices vs. the Nuclear Fusion Plant.

Table 7-7 Life Cycle Cost of the Nuclear Fusion Plant and Mitigation Devices.

		Life Cycle Cost (Construction + O&M)
Nuclear Fusion Power Plant		10,072.13 M\$
Mitigation Device	Heat Storage-filled SG	57.56 M\$
	NaS Battery	2,344.57 M\$
	External Ancillary Service	0 M\$

### 7.3.2 売電収入

売電については、核融合発電所が発電した電力を 1) リアルタイム市場で全量売電した場合、2) 前日市場で全量売電した場合、3) 1年間の長期相対契約で全量先渡し売電した場合の3例につき比較を行った。プラズマディスラプションの発生頻度を 0.00001 回/hour と仮定した場合における平均売電収入の比較を Figure 7-5 に、平均並びに標準偏差の試算結果を Table 7-8 に示す。

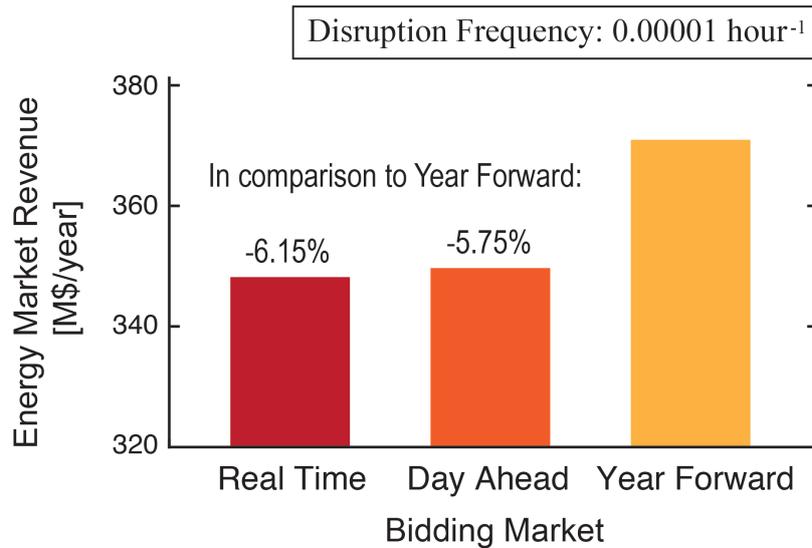


Figure 7-5 Average Energy Market Revenues (Disruption Frequency = 0.00001/hour).

Table 7-8 Energy Market Revenues (Disruption Frequency = 0.00001/hour).

		Energy Market Revenue
Bidding Market	Real Time	348.43 ± 59.27 M\$/year
	Day Ahead	349.93 ± 60.75 M\$/year
	Year Forward	371.27 ± 23.78 M\$/year

この結果は、プラズマディスラプション頻度が十分に低い場合において、売電収入金額は

長期先渡し契約 > 前日市場 > リアルタイム市場

の順となることを示している。ただし、プラズマディスラプション頻度にかかる感度分析結果については、後の7.4.1節において論じる。

### 7.3.3 インバランス料金

インバランス料金についても、売電をリアルタイム市場・前日市場・長期相対契約で行っていた場合のそれぞれについて試算を行った。インバランス料金はプラズマディスラプションが発生する時期・時刻によって異なるものの、10,000回の試行における平均値はTable 7-9の通りであった。これは、プラズマディスラプションが

発生した場合、10 日間の発電停止による機会損失に加え、Table 7-9 に示される金額の“罰金”が追加で課せられることを意味する。

Table 7-9 Average Imbalance Payment per Plasma Disruption.

		Ave. Imbalance Payment
Bidding Market	Real Time	0.0887 M\$/Disruption
	Day Ahead	1.6926 M\$/Disruption
	Year Forward	50.080 M\$/Disruption

### 7.3.4 アンシラリーサービス収支

発電所内に NaS 電池を設置した場合、平常運転時には NaS 電池を使用しないと仮定し、これを用いてアンシラリーサービス市場に周波数調整サービスを提供することにより、アンシラリーサービス収入を得ることが可能である。逆に、発電所内に緩和装置を設置せず、プラズマディスラプション発生時に周波数調整市場から予備力を調達する場合、利用時にはそれに応じた料金を市場に支払うことになる。

以上を勘案し 7.2.1.3 節し示すモデルから試算された、ライフサイクルでのアンシラリーサービス収支の均値並びに標準偏差の試算結果を Table 7-10 に示す。代表例として、RMCP = 20.35 \$/MWh、プラズマディスラプション頻度 0.0001 回/年における値を示している。（正が収入、負が支払いを表す。）

結果は、NaS 電池を導入した場合、その運用により 30 M\$/year 前後の収入が見込めること、並びにプラズマディスラプションの発生頻度が合理的に低い場合、外部サービスを利用した緩和にかかる費用は非常に小さく、およそ 3,000 \$/年程度であることを示している。

Table 7-10 Average Ancillary Service Revenue (RMCP = 20.35 \$/MWh, Disruption Frequency = 0.0001/hour).

		Ancillary Market Revenue
Mitigation Device	Heat Storage-filled SG	0 M\$/year
	NaS Battery	30.0170 ± 3.0334 M\$/year
	External Ancillary Service	- 0.0025 ± 0.0027M\$/year

### 7.3.5 現在試算価値試算

最後に、7.3.1 節から 7.3.4 節において示された試算結果を全て織り込んだ最終的な核融合発電所のライフサイクル（40 年間）における NPV を試算した。ここで、NPV はプラズマディスラプションの頻度、導入する緩和装置の種類、電力市場における RMCP、並びに売電を行う市場の 4 点に大きく影響を受ける。従って本章においては、プラズマディスラプション頻度（0.001 – 0.00001 times/hour）並びに RMCP（2 – 200 \$/MWh）について感度分析を実施し、これら 2 パラメータを対数軸として x 軸・y 軸に取った上で NPV を z 軸に作図を実施することで、試算結果を示す。即ち、曲面の高さが高いほど、核融合発電所の経済性が高く推計されたことを表している。

Figure 7-6 に蓄熱材充填 U 字蒸気発生器を導入したケース、Figure 7-7 に NaS 電池を所内に導入したケース、Figure 7-8 に周波数調整予備力を外部市場から調達したケースの結果をそれぞれ示す。

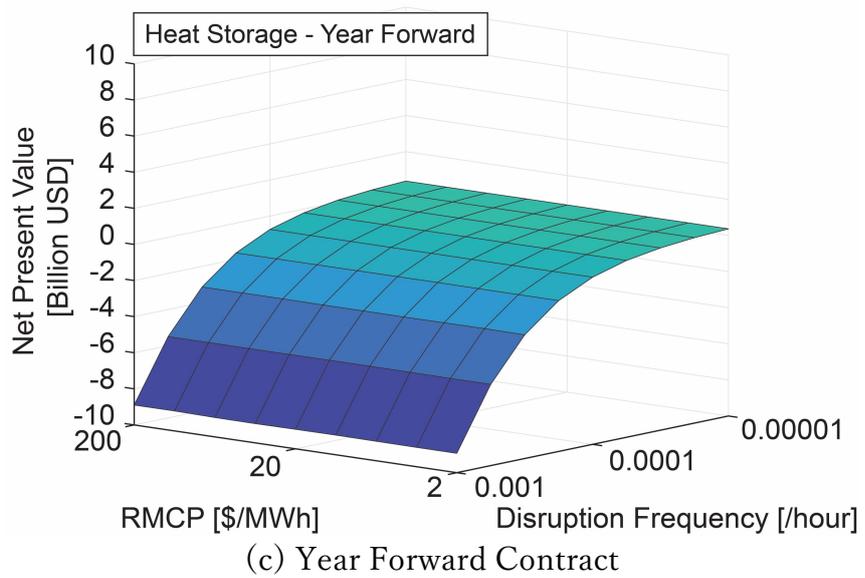
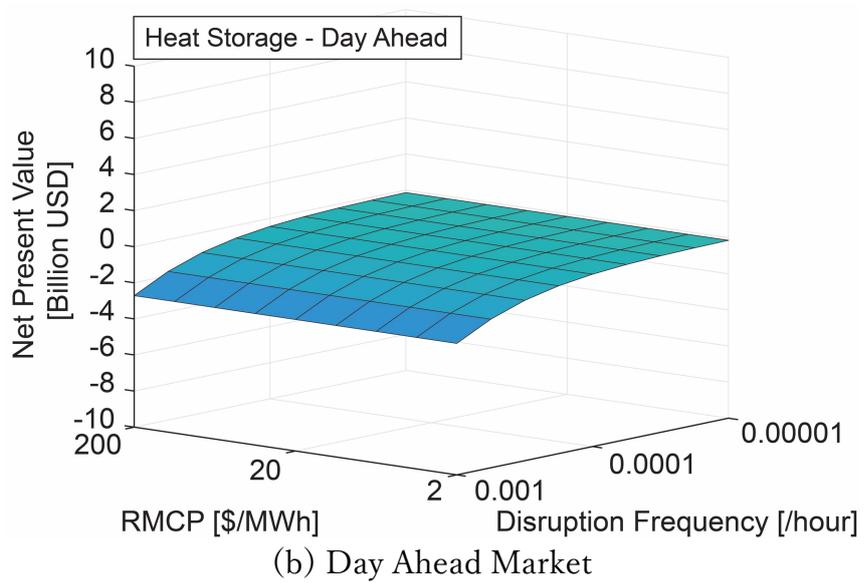
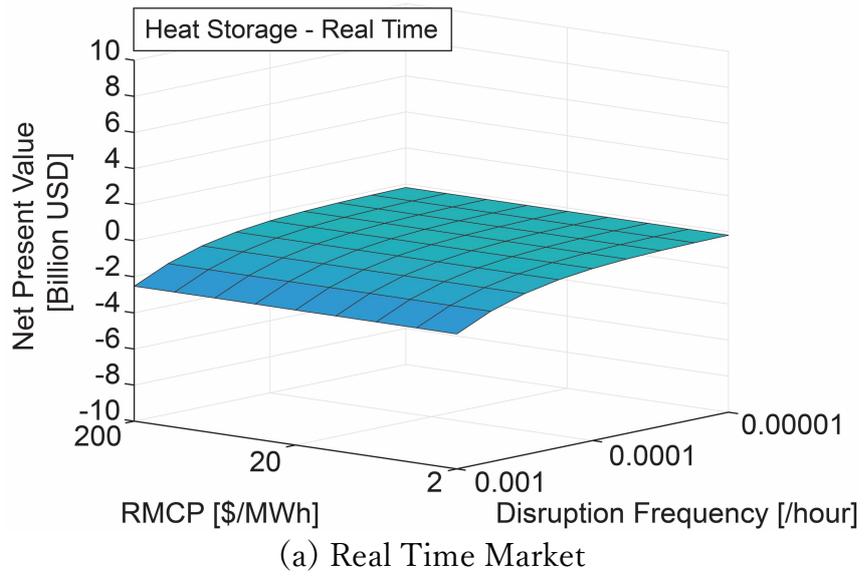


Figure 7-6 NPV of Nuclear Fusion Power Plant with Heat Storage.

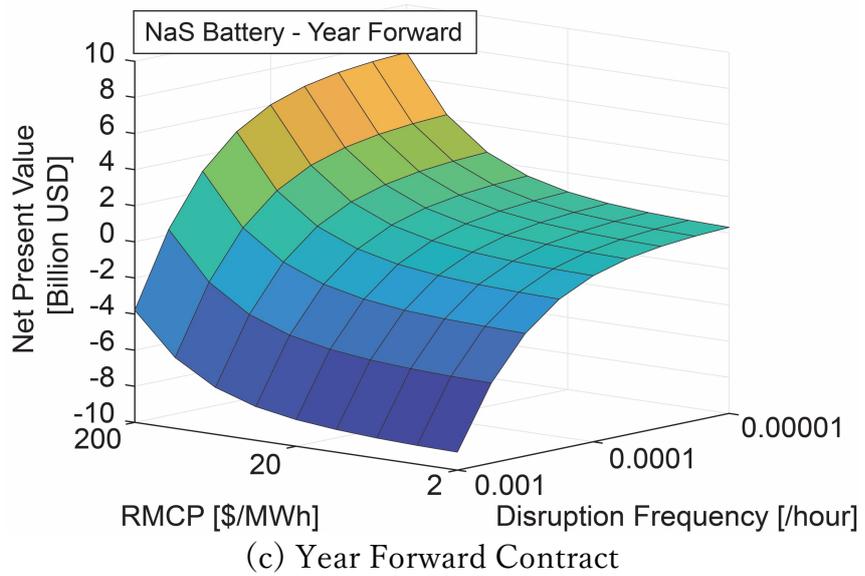
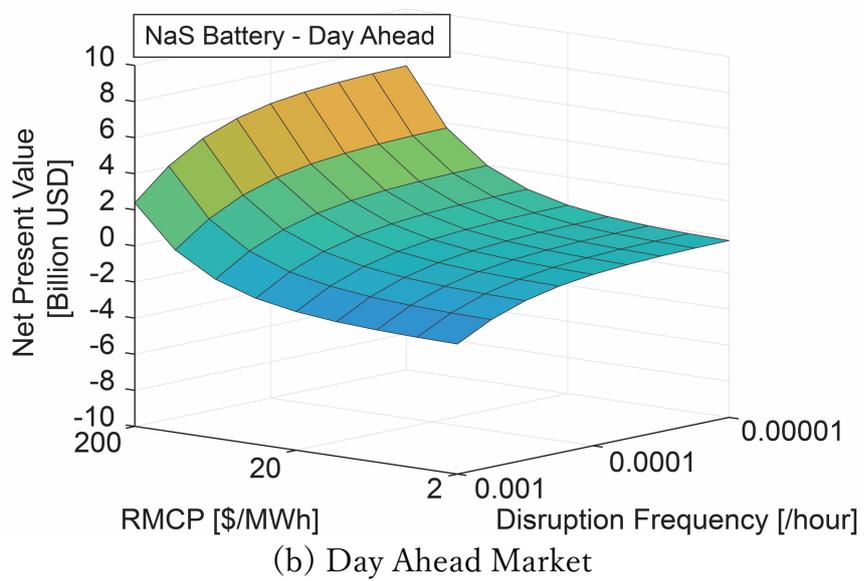
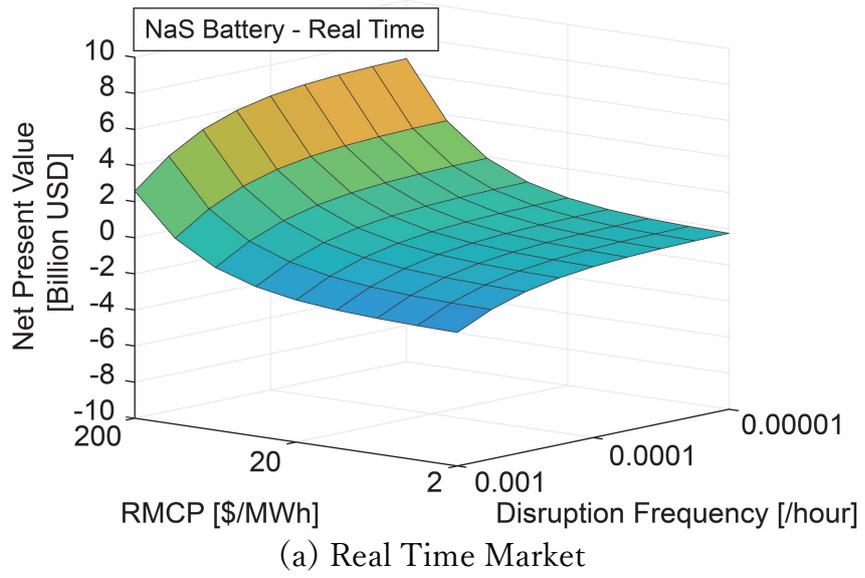


Figure 7-7 NPV of Nuclear Fusion Power Plant with NaS Battery.

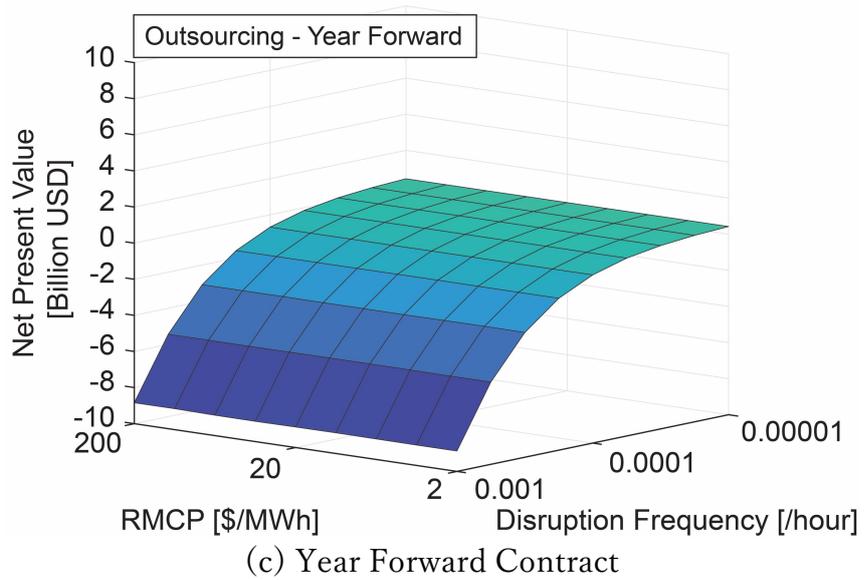
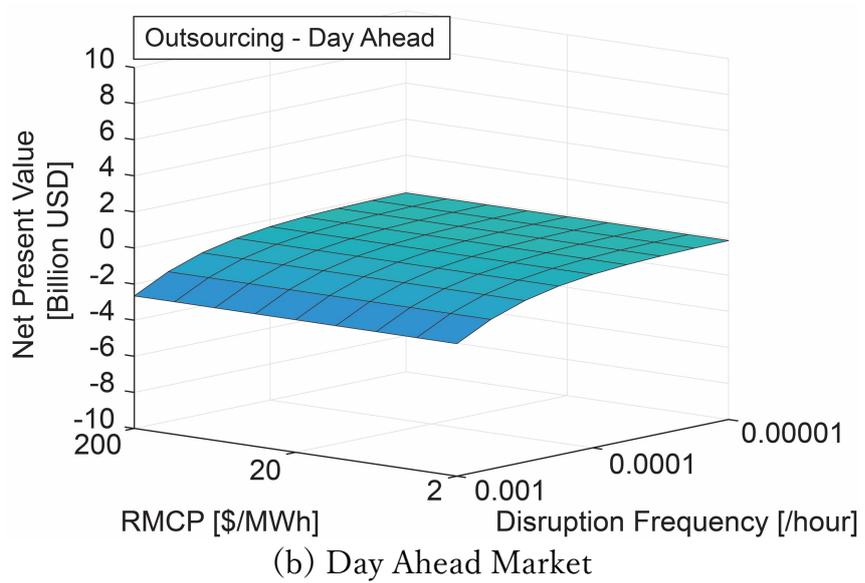
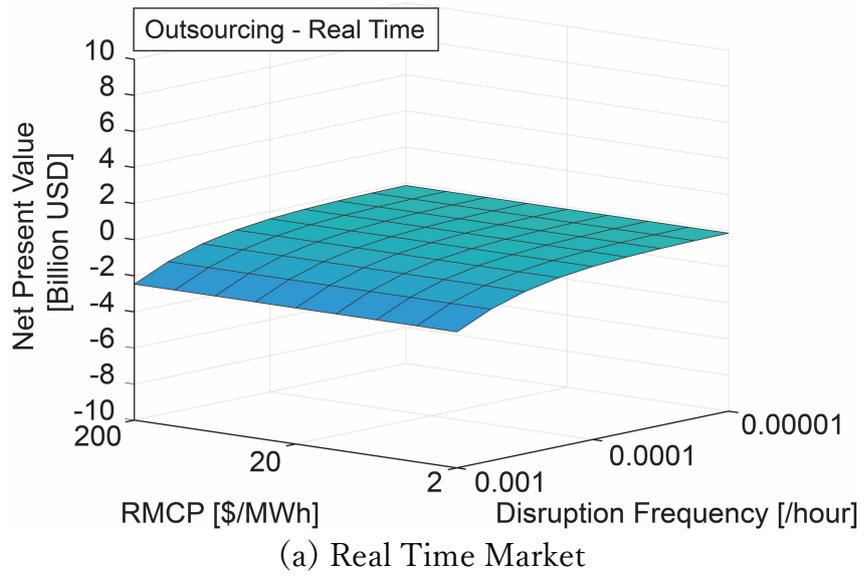


Figure 7-8 NPV of Nuclear Fusion Power Plant with Outsourced Regulation Service.

### 7.3.5.1 プラズマディスラプション頻度の経済性への感受性

はじめに Figure 7-6 より Figure 7-8 から、プラズマディスラプション頻度のもつ核融合発電所の経済性への感受性について考察する。

Figure 7-6 から Figure 7-8 のグラフは全て、プラズマディスラプション頻度が大きくなるにつれて、核融合発電の経済性が悪化することを示している。特に(a)リアルタイム市場 (b)前日市場 (c)先渡し契約の3グラフを比較すると、どの緩和手法を選択した場合においても、

長期先渡し契約 > 前日市場 > リアルタイム市場

の順にプラズマディスラプション頻度の経済性への感受性が大きいことが読み取れる。これは、より長期間の売電契約を結ぶほど、プラズマディスラプションあたりの”罰金”であるインバランス料金が非常に大きくなるためである(7.2.1.2節)。

プラズマディスラプション頻度の経済性への感受性について、採用する緩和手法ごとに比較を行った結果、緩和手法間における経済性への感受性の違いは認められなかった。

### 7.3.5.2 RMCP の経済性への感受性

市場における RMCP (即ちアンシラリーサービス市場におけるサービス単価) の核融合発電所経済性に対する感受性は、採用する手法によって大きく異なった。

Figure 7-6 は熱浴を備えた核融合発電所の経済性を示すが、本試算においては経済性の RMCP に対する感受性は認められなかった。熱浴を備えた核融合発電所は、平常時・プラズマディスラプション時ともにアンシラリーサービス市場におけるサービス売買を行わないために、この結果は当然であると言える。

Figure 7-7 は NaS 電池を緩和装置として核融合発電所に備えた場合の経済性を示すが、本試算においては経済性の RMCP への大きな正の感受性が認められる。Figure 7-7 は RMCP が大きいほど核融合発電所の経済性が高くなることを示しているが、これは、平常時において NaS 電池がアンシラリーサービス市場において周波数調整を行うことで、市場より収入を得るためである。従って、市場にアンシラリーサービス単価が高いほど収入も大きくなり、従って核融合発電所の経済性も高くなる。

Figure 7-8 はプラズマディスラプションにかかる即時解列時の影響緩和をアンシラリーサービス市場を通じ外部に頼る場合における核融合発電所の経済性を示したものであるが、本試算においては極めて僅かながら RMCP に対する負の感受性が見られる。これは、プラズマディスラプションが発生した際にアンシラリーサービス市場に対して支払いを行う必要があるためであり、従ってアンシラリーサービス単価が高くなると核融合発電所の経済性も悪くなる。しかしながら、即時解列一回あたりの支払い単価は数千ドルと非常に安価であるため(7.3.4 節)、感受性は無視できるほど小さかった。

### 7.4 考察

#### 7.4.1 核融合発電所の自由化電力市場における経済的戦略

本経済性試算から得られる重要な知見の1つは、将来の自由化電力市場における核融合発電所の最適な運用にかかる戦略である。即ち、核融合発電所を電力市場においてマネタイズする観点から、核融合発電所の現在資産価値(NPV)を最大化する運用方法について考察することで、将来における発電所運用戦略について考察を行うことが出来る。

ここで重要となるのは、1) 核融合発電所において発電した電力をいずれの電力市場を通じて売却するのか、2) 核融合発電所の設計にあたりどの緩和手法を選択するのか、の2点である。

#### 7.4.2 最適売電市場にかかる考察

はじめに核融合発電所の最適な売電市場について考察する。7.3.2 節は、プラズマディスラプションの頻度が低い場合、長期先渡し契約を結ぶことが収入を最大化することを示唆した。一方、7.3.3 節は、長期先渡し契約を結んだ場合、プラズマディスラプションあたりの”罰金”であるインバランス料金が非常に大きくなることを示した。このことは、核融合発電所は、プラズマディスラプションの頻度に応じて、最適な売電市場が異なることを示唆し、Figure 7-6 から Figure 7-8 はそれを裏付けるものである。

一例としてNaS電池導入ケースである Figure 7-7 (a), (b)並びに(c)を比較すると、予測の通り、プラズマディスラプション頻度が低い領域においては(c)先渡し市場における売電が最も NPV を大きくする一方、逆に頻度が高い領域においては(a)リアルタイム市場における NPV が最も高いことが示されている。この傾向につき考察を行うため、Figure 7-7 について1つの空間に重ねて描画したものを Figure 7-9 に示す。Figure 7-9 は、NaS 電池導入ケースについて、リアルタイム市場、前日市場、先渡し市場における経済性を示したものであり、これら3つの曲面においてもっとも位置が上である曲面が、示された領域における最適な売電先市場である。

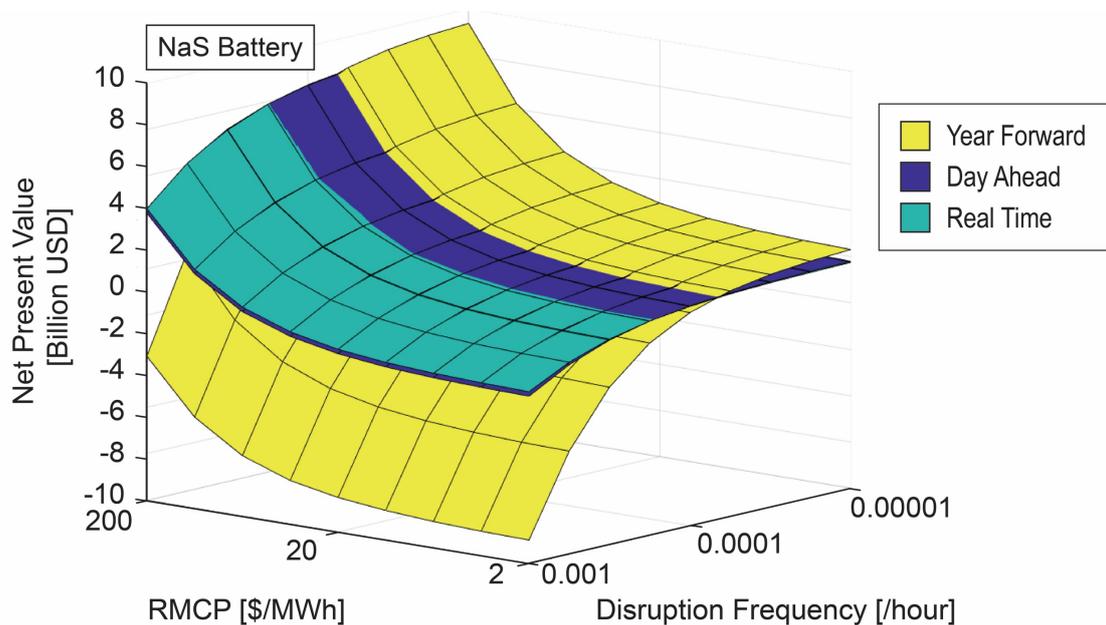
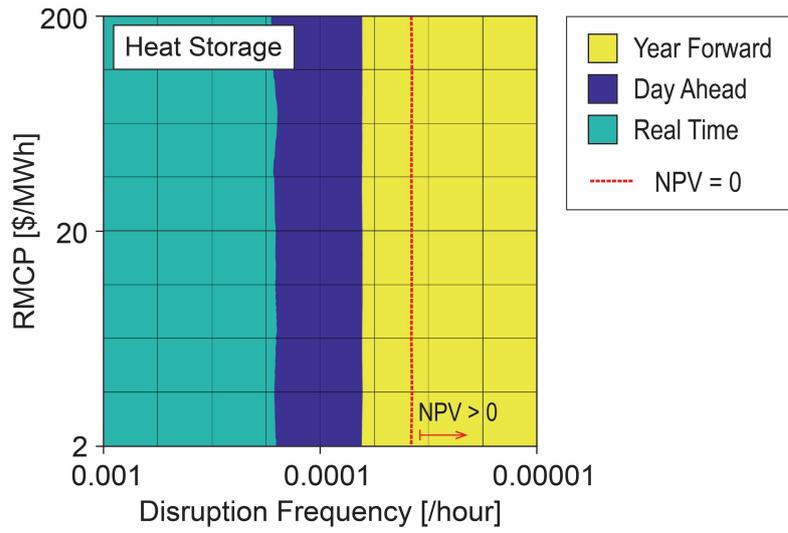


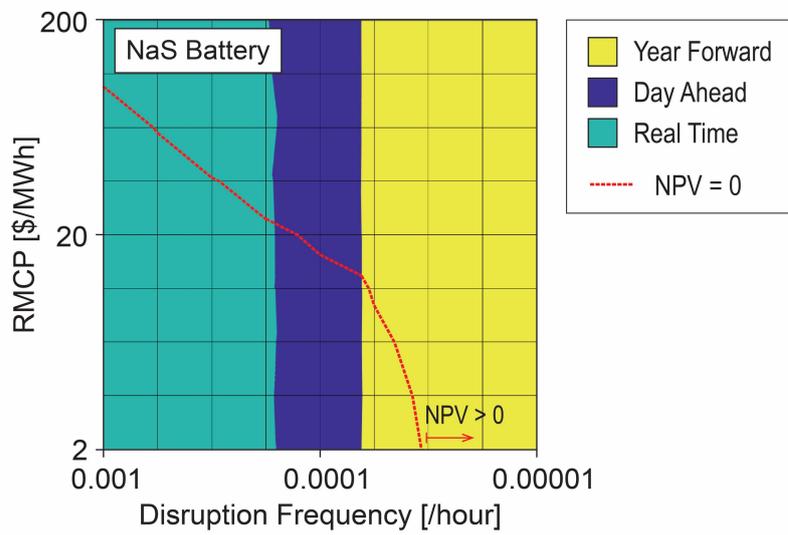
Figure 7-9 Comparison of NPVs of Nuclear Fusion Power Plant with NaS Battery.

Figure 7-9 は、プラズマディスラプション発生頻度が十分に低い場合、核融合発電所は長期相対契約による売電を行うことが収入を最大化する一方、プラズマディスラプション頻度が高くなるにつれて核融合発電所の経済性が低下していき、最終的にはリアルタイム市場における売電運用が NPV を最大化することを示している。一方で、RMCP については、最適売電市場への感受性が見られなかった。

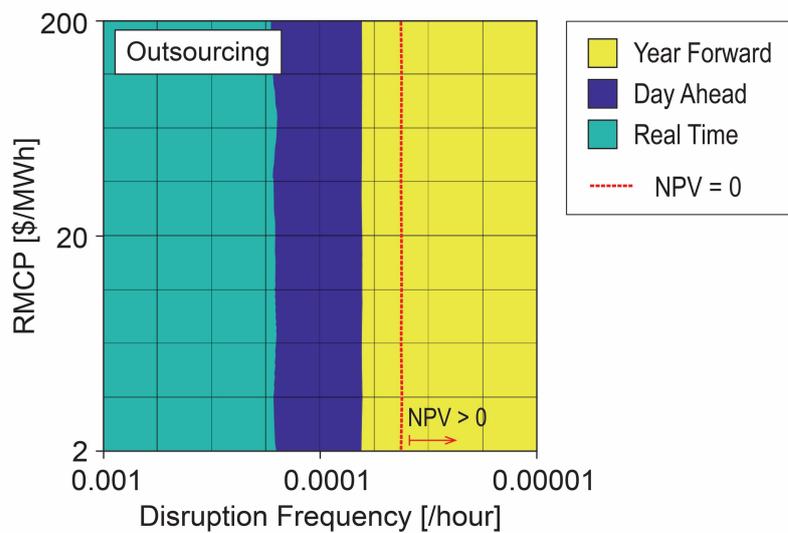
これを領域として二次元図上に示し、さらに NPV = 0 における等高線を加えたものが Figure 7-10 である。Figure 7-10 は、色分けによりそれぞれのディスラプション頻度-RMCP 領域における最適な売電先市場を示している。さらに、赤点線において NPV = 0 となるラインを示しており、本簡易 PJM 市場モデル上において、核融合発電所が経済的に利潤を生む領域は赤点線の右側であることを示すものである。



(a) Heat Storage



(b) NaS Battery



(c) Outsourced Ancillary Service

Figure 7-10 Optimal Energy Market Domains.

Figure 7-10 は、核融合発電所の最適な売電先はプラズマディスラプション頻度によって最適な運用市場が決定され、RMCP 並びに緩和装置シナリオはこれに影響を与えないことを示している。ここで、リアルタイム市場より前日市場が優位になる発生頻度は  $1.63 \times 10^{-4}$  times/hour 以下 ( $\cong$  1.30 回/年以下)であり、前日市場より長期先渡し契約が優位になる発生頻度は  $6.43 \times 10^{-5}$  times/hour 以下 ( $\cong$  0.51 回/年以下)であった。

NPV が正になる領域の傾向は、緩和装置シナリオごとに異なる結果を示している。蓄熱装置シナリオ(Figure 7-10 (a))並びに外部調達シナリオ(Figure 7-10 (c))においては  $NPV > 0$  となる領域は RMCP に対する感受性を持たず、それぞれ境界は蓄熱装置シナリオで  $3.78 \times 10^{-5}$  times/hour 以下 ( $\cong$  0.30 回/年以下)、外部調達シナリオにおいて  $4.21 \times 10^{-5}$  times/hour 以下 ( $\cong$  0.34 回/年以下)であった。またどちらのシナリオにおいても、長期先渡し契約のケースにのみ  $NPV > 0$  となる領域が存在している。NaS 電池導入シナリオ(Figure 7-10 (c))においては  $NPV > 0$  となる町域について RMCP に対する感受性が見られ、他の2シナリオよりも広い領域にて  $NPV > 0$  となることが示されている。基準値である  $RMCP = 20.35$  \$/MWh における境界は  $1.27 \times 10^{-4}$  times/hour ( $\cong$  1.0 回/年)であったが、RMCP の値によって、リアルタイム市場にも  $NPV > 0$  となる領域が存在することが確認できる。

以上をまとめると、本研究において示唆された核融合発電所の緊急停止頻度と最適なエネルギー市場の関係は Figure 7-11 の通りとなる。Figure 7-11 は横軸にプラズマディスラプション頻度を取り、最適な売電先市場、並びに  $NPV > 0$  となる領域について模式的に示すものである。

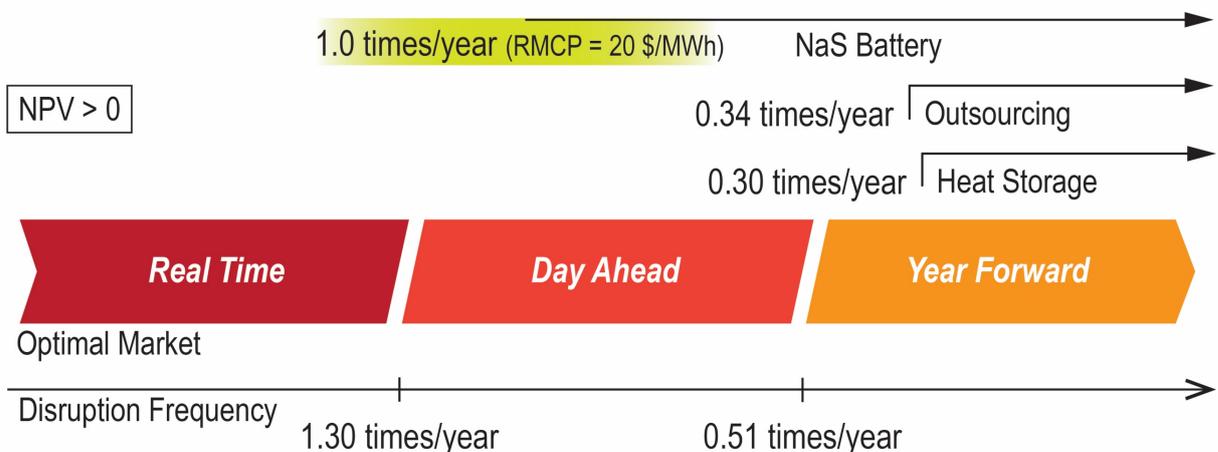


Figure 7-11 Optimal Bidding Energy Market for Fusion Power Plant.

これは、NaS 電池のような蓄電装置を備えてアンシラリーサービス市場に参入するケースを除いて、核融合発電所のプラズマディスラプション頻度は 0.3 回/年以内に抑え、その上で長期先渡し契約を結ばない限り、核融合発電所が経済的に成立しないことを示唆するものである。

具体的に  $NPV > 0$  を実現するプラズマディスラプション頻度については、将来電力市場における電力価格に依存するものであり、本研究結果はあくまで一つのケースを示したものである。しかしながら、将来電力市場における電力価格動向がどのようなものであっても、プラズマディスラプション頻度によって最適な売電先市場が変化するという本発見の骨子そのものは変わらないと考えられる。

### 7.4.3 最適緩和手法にかかる考察

次に、将来の核融合発電所の建設にあたり、最も経済的に合理的な緩和手法につき Figure 7-6 から Figure 7-8 に基づき考察を行う。7.4.1 節は緩和手法のうち、NaS 電池の導入に優位性があることを示唆しているが、これは必ずしも全てのケースにつき当てはまらない。蓄熱材充填 U 字蒸気発生器のコストは単純な初期投資であるのに対して、NaS 電池のコストは導入費+O&M 費用が膨らむ一方、アンシラリーサービスによる収入が見込まれる。さらに、将来先進国においては、各家庭の EV や燃料電池等の VPP による電力供給が可能であり、場合によっては DR による抑制でも同様の効果が考えられる。この場合には、キャピタルコストが不要となり、プラズマディスラプション発生時にのみ利用料金を支払えば緩和が可能である。従って、一定の RMCP 並びにディスラプション頻度に応じ、最適な緩和手法は変化する。

ただし、将来の電力系統の全てがアンシラリーサービス市場を備えているとは考えられず、核融合発電所の建設先において利用できる緩和手法に応じ、経済的に最適な手法を選択せねばならない。

従って、本節においては、①蓄熱装置、②NaS 電池、③外部調整電源の 3 手法のうち、現地系統において利用できる緩和手法に応じた複数ケースにつき、それぞれの電力系統における最適な手法を 7.4.1 節と同様の手法により考察する。

#### 7.4.3.1 アンシラリーサービス市場の存在しない電力市場 (①利用可能)

アンシラリーサービス市場が存在しない場合、市場から緊急時の予備力を調達することはできず、かつ市場において NaS 電池をマネタイズすることも出来ない。従

ってこの場合、利用可能な緩和手法としては①蓄熱装置、②NaS 電池の2手法が存在する。NaS 電池は蓄熱装置と比して40倍以上のライフサイクルコストが必要となるために第一選択とはなり得ず、全条件において①の蓄熱装置が経済的に合理的な選択肢となる。

7.4.3.2 アンシラリーサービス市場が存在するが、市場に十分な瞬動予備力が提供されていない電力市場 (①・②利用可能)

電力市場にアンシラリーサービスの市場メカニズムが存在するものの、核融合発電所の緩和に十分な瞬動予備力 (635.6 MW-105.9 MWh 以上) は供給されていない市場における最も経済的に合理的な緩和手法は、Figure 7-6 並びに Figure 7-7 から導かれる。Figure 7-6・Figure 7-7 を重ねて描画することによって得られた領域別の最適緩和手法について、Figure 7-12 に示す。Figure 7-12 は、Figure 7-10 と同様の手法によって最適な緩和手法並びに  $NPV > 0$  となる領域を示したものである。Figure 7-12 は適切な緩和手法が主に RMCP に感受性を持っており、RMCP が一定以上大きい場合には NaS 電池による緩和が経済的に合理的であることを示している。これは、RMCP が一定値以上の市場においては、NaS 電池がもたらす周波数調整による収入が NaS 電池の高額なライフサイクルコストをオフセットするためである。

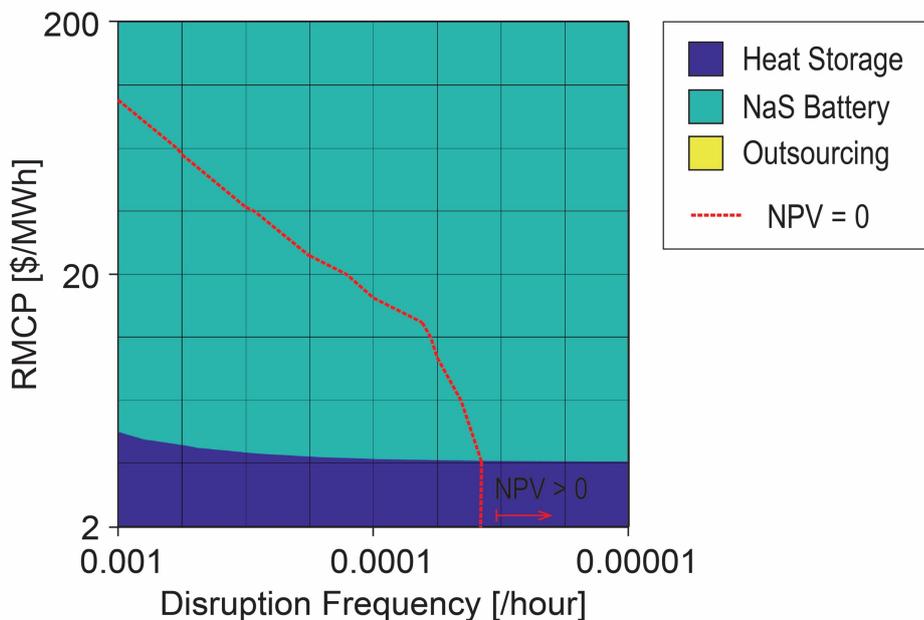


Figure 7-12 Optimal Mitigation Measures on an Electricity Market without Adequate Ancillary Service Capacity.

Figure 7-12 に示された RMCP の境界値は 3.61 \$/MWh 前後 (Disruption Frequency = 0.00001 times/hour)であり、電力市場の RMCP がこの値以下の場合には、アンシラリーサービス市場を通じ、外部瞬動予備力を利用した緩和手法が経済的に合理的となることが示唆された。

7.4.3.3 アンシラリーサービス市場が存在し、市場に十分な瞬動予備力が提供されている電力市場 (①・②・③利用可能)

電力市場にアンシラリーサービスの市場メカニズムが存在し、かつ核融合発電所の緩和に十分な瞬動予備力 (635.6 MW-105.9 MWh 以上) が供給されている市場における最も経済的に合理的な緩和手法は、Figure 7-6 から Figure 7-8 を重ねて比較することで、Figure 7-13 の領域の通り導かれる。Figure 7-13 は Figure 7-12 と同様、最適な緩和手法並びに NPV > 0 となる領域を示したものである。

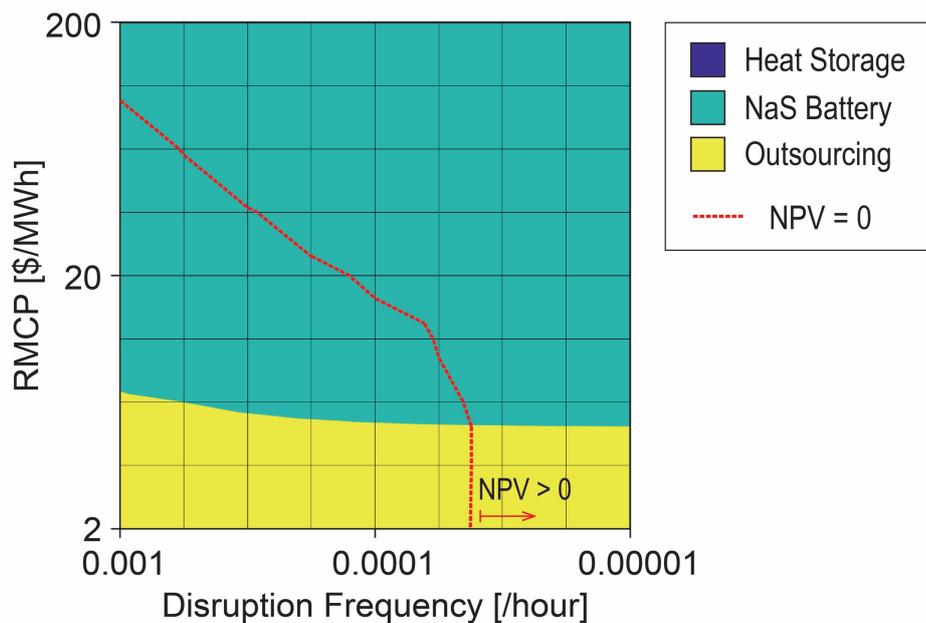


Figure 7-13 Optimal Mitigation Measures on an Electricity Market with Adequate Ancillary Service Capacity.

Figure 7-13 が示す RMCP の境界値は 5.05 \$/MWh 前後 (Disruption Frequency = 0.00001 times/hour)であり、電力市場における RMCP がこの値以下の場合には、アンシラリーサービス市場を通じ、外部瞬動予備力を利用した緩和手法が経済的に合理的となることが示唆されている。

## 7.5 結言

これまで核融合発電所の導入戦略を論じるにあたっては、歴史上における軽水炉の導入など過去のトレンドの未来への外挿が行われてきた。これは本質的に、発電源である核融合発電所の性質とその導入先である電力市場の双方について、過去からの連続性を仮定した戦略立案が為されてきたことを意味する。しかしながら本論文において筆者は、核融合発電所にはプラズマディスラプション発生時における電力系統過渡安定度への影響という新たな制約が存在することを示し、導入のためには特別な緩和手段が必要であることを示した。さらに電力市場は現在世界的に変革期にあり、核融合発電所が導入される将来電力市場は過去の電力市場とは異なる性質を備えていることを併せて示した。これは即ち、過去に行われた核融合発電所の導入戦略に関する議論には既に無効な論拠に基づくものが多数存在すること示唆するものであり、将来の核融合発電所の電力市場への導入戦略につき新たな考察を行う必要があったと言える。

以上の背景から、本章においては本論文の締めくくりとして、本論文によって明らかになったプラズマディスラプションに起因する即時解列並びにその影響緩和装置の存在が、将来の自由化電力市場への核融合発電所導入戦略に如何なる影響を与えるかにつき経済性の面から定量的考察を行った。

将来電力系統としては売電事業が自由化された全面プール市場を仮定し、Matlab上において実マーケットデータに基づき簡易 PJM 市場モデルを構築した。緩和装置としては、蓄熱装置、所内 NaS 電池、アンシラリーサービス市場を通じた外部調達 の3シナリオを設定した。これらのシナリオにつき、モンテカルロ法によりプラズマディスラプションを発生させ、割引率 1.7%での運用 40 年における核融合発電所の現在資産価値(NPV)を試算した。

試算の結果は、自由化電力市場においては緊急停止に起因するインバランス料金の支払いの存在により、従来の想定よりプラズマディスラプション発生頻度が核融合発電所の経済性に与える負の感受性が非常に大きくなることを示した。またこれにより、プラズマディスラプションの発生頻度に応じ核融合発電所の経済的に最適な売電先市場が変化することが併せて示された。従って核融合発電所が経済性合理性を持つためにはプラズマディスラプション頻度を低く抑え、収益を最大化するため長期先渡契約を結んで売電する必要があるため、そのためには発生頻度を一定値以下(本市場モデルではおよそ 0.3 回/年以下)に抑える必要があることが示された。

## 第7章 核融合発電所の自由化電力市場への経済的導入戦略

導入する緩和手法については、将来の電力市場におけるアンシラリーサービス市場の利用単価である RMCP (Regulation Market Clearing Price) の動向に応じ経済的に合理的な手法が変化することが示された。核融合発電所建設にあたり NaS 電池をはじめとした二次電池を導入した場合、本蓄電装置を用いてアンシラリーサービス市場を通じて電力系統に周波数調整力を提供することが可能になり、これにより RMCP が高い市場（本市場モデルでは 5.05 \$/MWh 以上）においては二次電池の高額なライフサイクルコストをオフセットする市場収入を生み出すことが示された。

これらの発見は、従来用いられてきた発電単価 (LCOE) により核融合発電所の経済性を論じる手法が、自由化電力市場には適応出来ないことを示すものである。核融合発電所の経済性について売電事業の市場自由化を考慮して論じた研究は他になく、将来の電力市場において自由化の潮流が今後一層進展すると予測されることを鑑みれば、本成果は核融合開発戦略上重要な知見を与えるものである。また、構築された簡易 PJM 市場モデルは今後の自由化電力市場における経済性研究に応用可能であり、汎く有用な成果であると考えられる。

## 8 結論

人類の文明と生存の基盤はエネルギーである。これは翻せば、エネルギー利用に必然的に伴うエントロピー増大こそが人類の安定的生存の最大の制約条件であることを意味する。産業革命以降の数世紀に渡る無定見なエネルギー資源の消費により、人類の（当面の）生存圏たる地球上におけるエントロピーは持続不可能な水準で増大している。そしてその顕現こそが、地球温暖化に代表される環境問題と総称される諸課題であると言える。人類の長期的かつ安定的生存のため、我々はエネルギー科学のさらなる発展を以て Jevons Paradox を超え、21 世紀中にエントロピー増大のモメンタムを止め安定相への能動的な到達を図らねばならない。そして燃料資源が地球上に事実上無尽蔵に存在し、温室効果ガスを生じない熱生成手法たる核融合反応の実用化は、この目的に大いに資するものである。

核融合発電の実用化に向けては、世界において各方面で精力的な研究が為されてきた。しかしながらその中において、核融合反応により発生した熱を電気エネルギーに変換する過程、さらには電気エネルギーの供給先である電力系統への影響については、従来研究がほとんど為されてこなかった。本来核融合というリードタイムの長いエネルギー技術の研究にあたっては、常に将来の社会の有り様を予測し、その受容性を左右するポイントを見極め、それを見通した研究開発を実施せねば、社会への成功裏の導入は成らない。

受容とは「受け入れて取りこむこと[19]」を意味する単語であるが、Davis ら(1989)[21]の Technology Acceptance Model を核融合発電所に適用するならば、核融合の持つと考えられる優れた特性(Perceived usefulness)のみで社会に受け入れられると考えるのは誤りであり、その導入が社会に対しストレスを生じない見通しを示す(Perceived ease-of-use)ことが併せて必要であると言える。特に核融合発電所は電力という社会の基盤インフラに関わる新技術であり、その社会的責任は重い。即ち核融合の実用化へ向けた研究にかかる諸々の要求事項は核融合発電所が導入される社会側に由来するものであり、特に電力系統に安定して電力を供給できるという社会への保証こそが、核融合発電所の実用化における最低限の必要条件なのである。核融合発電所の導入が見込まれる将来の電力系統は現在のそれと異なる性質を

有することが予期されることから、将来の電力系統に核融合発電所が与える影響を考察し、これを早期から核融合の開発戦略に織り込むことが喫緊の課題であったと言える。

核融合開発コミュニティにおいても本課題は認識され始めており、我が国の核融合科学技術委員会は「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」(2017)[14]において、将来の電源構成にはいまだ不確実性があると述べ、“核融合開発は、…社会に受け入れられるエネルギー源を目指すという普段の努力が必要である。”“他の温室効果ガスと比べた経済合理性を重視しつつ、…柔軟で付加価値の高い電源を目指した研究を展開するなどの努力が今後期待される。”と明記している。

以上から本論文の目的は、核融合発電所が導入される将来の電力系統の有り様を予測し、その予測に基づき核融合という新エネルギー源を将来電力系統に成功裏に導入するために必要となる条件について定量的に分析することで、将来の社会導入に向けた核融合開発戦略に新たな知見を与えることと設定された。本目的のため、

- 1) 核融合を用いた発電手法に関し具体的な検討を実施し
- 2) 核融合発電所が将来の電力系統で如何なる振る舞いをするか予測し
- 3) 電力系統への受容性にどのような影響があるかを定量的に評価する

研究が実施され、核融合発電所の実用化に資する一連の新たな知見を得た。本論文の各章において得られた知見を以下にまとめる。

第1章では、核融合研究の背景並びに実用化に向けた研究課題について概観した。その上で、それら踏まえ、本論文の目的を設定した。

第2章では、世界における電力市場の現状を概観し、その将来像について見通しを示した。さらに、発電所の受容性を左右する重要な要素として電力系統安定性が存在することを記述し、中でも特に重要である周波数制御につき論じた。

第3章では、核融合発電所について、その構成、環境負荷等について概観した。さらに、世界各国において実施された概念設計についてのレビューを実施した。

第4章では、第3章で実施したレビューに基づき、将来の核融合発電所の想定として「定常運転/水冷却/トカマク炉/電気出力 1,200 MW」を設定し、この運転を再現する核融合発電所シミュレーションモデルを構築の上、PWRの発電システム

を核融合発電所に採用する妥当性について評価するとともに、プラズマディスラプション発生時における発電所の運用シナリオを検討した。

結果は定常運転時において PWR と齟齬の無い条件での発電システムの運用が可能であることを確認した一方、プラズマディスラプション発生時には発生後 144.7 秒において蒸気発生器における溢水が発生することが示唆されるなど、PWR より遙かに急速に事態が進展することが示された。

定常核融合発電所のシミュレーションモデルは本研究において初めて構築されたものである。現状のモデルは単純なプラズマディスラプションの模擬のみが可能なものであるが、今後適切なモデル拡張を行うことで、さらなる運用シナリオの検討、さらには制御理論の研究のため用いることが可能と考えられ、本モデルは核融合発電所の研究開発にあたり汎く有用な成果である。加えて、プラズマディスラプションが発電システムに与える重大な影響を指摘したのは本研究が初めてである。解析結果は、従来の定常水冷却核融合発電所設計についてその設計を見直す必要があることを示唆するものであり、今後の核融合発電所開発計画に対して少なからざる影響を与える知見である。

第5章では、第4章で示されたプラズマディスラプションにかかる即時解列の影響につき電力システムの側から考察するため、電力系統過渡安定度の評価モデルを新たに構築し、これを用いた定量的検討を実施した。結果、核融合発電所はプラズマディスラプション時の電力系統への影響から、導入が制限される領域が存在することが明らかとなった。この発見された導入制約を端的に表現するため、新たに定義された変数 Grid Characteristic Factor:  $\tau$ を用いた S-t Diagram が併せて提案された。

本結果は、「プラズマディスラプション発生時の電力系統安定性」という新たな導入制約が核融合発電所に存在することを初めて示したものである。本章において用いられたモデルの簡易性にかかる制約から、実際の核融合発電所の建設にあたっては再度詳細な評価が必要となると考えられるものの、核融合発電所の開発にあたってはその導入先たる将来電力系統の性質を考慮せねば導入が制約される、という指摘は従来と視座の異なる重要な見地であり、それを定量的に示した意義は大きいと言える。また、提案された S-t Diagram は約 100 万通りの演算結果を精度良く二次元平面上に集約することに成功したものであり、本図の考案もまた本導入制約が核融合発電所導入戦略に与える影響を理解する上において有用な成果である。

第6章では、第5章で示された電力系統への悪影響を緩和し、核融合発電所の電力系統受容性を向上させる2手法について検討を実施した。

1つ目の緩和手法は、発電システム内に熱浴を設けることで冷却材温度低下速度を緩和する手法である。この目的のため「蓄熱材充填 U 字蒸気発生器」の概念設計を実施し、この有効性を第4章のモデルを用いて評価した。結果は、半径拡張 2 m の条件で汽水分離器における溢水を 900 秒間回避できることを示唆した。また、本緩和手法について技術的・経済的両面から実現性があることを論じた。

2つ目は発電システム外において蓄電装置を接続し、プラズマディスラプション時に失われる電気出力を電氣的に緩和する手法である。本手法の有効性については第5章のモデルを用いて評価し、適切に設計された蓄熱装置により過渡安定度への影響が最小化できることが示された。また、本蓄電装置についても同様に技術的・経済的実現性が満たされていることを論じた。

提案された2手法はどちらも本研究が初出である。かつ、両手法ともに有用性・実現性が確認されたことから、本成果は将来の核融合発電所の系統への導入にあたり重要な役割を担う可能性があるものであると言える。

第7章では、本論文において論じたプラズマディスラプション発生時の即時解列並びに緩和装置の必要性が将来の核融合導入戦略に如何なる影響を与えるかを検討した。緩和装置としては、蓄熱装置、所内 NaS 電池、並びにアンシラリーサービス市場を通じた外部調達を3シナリオを設定した。これらのシナリオにつき、新たに構築した簡易 PJM 市場モデル上におきモンテカルロ法を用いてライフサイクルでの核融合発電所の経済性を試算した。結果はプラズマディスラプションの頻度が低い場合、長期先渡し契約を結ぶことが収入を最大化することを示した一方、長期先渡し契約を結んだ場合、インバランス料金が非常に大きくなることを示した。この結果、核融合発電所は、プラズマディスラプションの頻度に応じ、最適な売電市場が変化することが新たに判明した。これにより、LCOE により核融合発電所の経済性を論じる手法が、自由化市場には適応出来ないことが示された。

核融合発電所の経済性について電力市場の自由化を考慮して論じた研究は他になく、本成果は核融合開発戦略上重要な見地を与えるものである。また、構築された簡易 PJM 市場モデルは今後の経済性研究に応用可能であり、汎く有用な成果である。

本論文は、今まさに学術研究から実社会技術へと飛躍しようとしつつある核融合が、社会において成功裏に受け入れられる確率を最大限に高めるための努力の一環であり、その目指す方向性は我が国の核融合科学技術委員会を始めとした世界の核融合開発コミュニティが指向する方向と一致するものである。本論文において用いられた、将来導入先社会の有り様を予測し、その受容性を左右するポイントを見極め、導入にかかる条件を定量的に検討した上で、得た知見を核融合開発戦略に対してバックキャストするという手法は今後の核融合発電所の社会導入に向け汎く有用な知見を提供し得る手法である。電力系統への受容性に限らず、より広義での核融合の社会受容性を論じねばならない時期が早晚訪れるのは明白である。今後とも引き続き研究の深化を行う所存である。

本論文が核融合の社会実装に資し、引いては人類の安定的な生存相への到達の一助となることを願う。

# 謝辞

本研究は科研費 16J11105 の助成を受けたものである。

本研究を進めるにあたり、終始エネルギーに満ちたご指導と啓発を賜りました、私の指導教員たる京都大学エネルギー理工学研究所・小西哲之教授に心より敬愛と感謝の念を表します。また、博士一貫課程における指導教員でありました京都大学大学院総合生存学館・櫻井繁樹教授には、社会に貢献する人材としての在り方につき、自ら規範を示し暖かくも厳しいご指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。京都大学大学院エネルギー科学研究科・手塚哲央教授、京都大学エネルギー理工学研究所・長崎百伸教授並びに量子科学技術研究開発機構・日渡良爾先生には、本博士論文の執筆にあたり、大変貴重なご指摘の数々と、多大なるご指導ご鞭撻を頂きました。誠に有り難うございました。また関西大学システム理工学部・山本靖教授には、特に研究の構想段階において多くの重要なアドバイスを頂きました。ここに感謝致します。

東北大学金属材料研究所・笠田竜太教授には私の研究者としてのキャリアパスにつきご憂慮頂き、示唆に富んだアドバイスを沢山頂きました。同様に、東京工業大学先端原子力研究所・近藤正聡助教、光産業創成大学院大学・森芳孝准教授にも、アカデミアの道に分け入る覚悟につき叱咤激励を頂きました。ここに心より感謝申し上げます。また、京都大学エネルギー理工学研究所・興野文人先生には、自らの生き方をもって研究者並びに技術者のあるべき姿を教わったと感じております。ここに尊敬の念とともに感謝の念を表します。

研究にあたり様々な啓発を与えてくれた学友達にも、心からの謝意を表します。特に、like-minded として色々な計画に付き合ってくれた Richard Pearson 氏、研究室同期として支えてくれた南ヒヨソン氏、卓を囲んだ貴重な”ディスカッション”の時間を与えてくれた奥井剛氏、桐山京子氏、周敬棠氏らには、格別なる感謝の意を表します。

最後に、私の人生において、知的探究心と学問への尊敬を教えてくれた父・武田一哉に最大の謝意を表し、本論文を締めます。

# 関連業績

- 査読付き論文発表
  - i. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Plasma Control Requirements for Commercial Fusion Power Plants: A Quantitative Scenario Analysis With a Dynamic Fusion Power Plant Model*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018. **PP**(99): p. 1-6.
  - ii. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Environmental Life Cycle Assessment of High Temperature Nuclear Fission and Fusion Biomass Gasification Plants*. Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, 2017: p. 17582-17582.
  - iii. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Limitation of Fusion Power Plant Installation on Future Power Grids under the Effect of Renewable and Nuclear Power Sources*. Fusion Engineering and Design, 2016. 109-111: p. 1754-1758.
  - iv. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Requirements for DEMO from the Aspect of Mitigation of Adverse Effects on the Electrical Grid*. Plasma and Fusion Research, 2015. 10: p. 1205070-1205070.
  - v. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, *Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Small-Scale Electrical Grids*. Fusion Science and Technology, 2017. 68(2): p. 341-345.
- 査読付き国際学会発表  
(口頭発表)
  - vi. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, "Environmental Life Cycle Assessment of High Temperature Nuclear Fission and Fusion Biomass Gasification Plant," 2017 International Congress on

- Advancements on Nuclear Power Plant (ICAPP 2017), Kyoto and Fukui, (26 Apr. 2017): 17582.
- vii. Shutaro Takeda, Ryuta Kasada, Shigeki Sakurai and Satoshi Konishi, "Life Cycle Cost Analysis of Fusion Power Plant Installation Scenarios to Deregulated Electricity Market," 22nd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE 2016), Philadelphia, PA (23 Aug. 2016): 18159.
  - viii. Shutaro Takeda, Ryuta Kasada, Fumito Okino, Shigeki Sakurai and Satoshi Konishi, "Oceanic Behavior of Tritium upon Deep-water Release," 11th International Conference on Tritium Science & Technology (TRITIUM 2016), Charleston, SC (21 Apr. 2016): 13B-2.
  - ix. Satoshi Konishi, Shutaro Takeda, Ryuta Kasada, "Tritium Constraints and Strategy for the Fusion Deployment," 11th International Conference on Tritium Science & Technology (TRITIUM 2016), Charleston, SC (18 Apr. 2016): 4B-3.
  - x. Satoshi Konishi, Shutaro Takeda and Ryuta Kasada, "Environmental Impact and Social Acceptance of Fusion in the Future Energy Market," The 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-12), Jeju (14 Sep. 2015): O1C4.
  - xi. Satoshi Konishi, Kyosuke Namba, Shutaro Takeda and Ryuta Kasada, "Environmental Impact of the Tritium Emission from Fusion Energy under Innovative Deployment Scenarios with Fuel Production," 2015 IEEE 26th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2015), Austin, TX (4 June 2015): SO24-2.
  - xii. Shutaro Takeda, Satoshi Konishi, Yasushi Yamamoto and Shigeki Sakurai, "Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Regional Power Systems," 21st Topical Meeting: Technology Of Fusion Energy (TOFE 2014), Anaheim, CA (12 Nov. 2014): O5B.
  - xiii. Satoshi Konishi, Shutaro Takeda, Yasushi Yamamoto and Ryuta Kasada, "Fusion Plant and Local Grid System with Innovative Energy Storage by Inverse Dam," Plasma Conference 2014, Niigata (21 Nov. 2014): 21pE-5.

(ポスター発表)

- xiv. Satoshi Konishi, Shutaro Takeda, “Japan Future Electric Market and Fusion Deployment Strategy with Electricity Storage Systems,” 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto (21 Oct. 2016): SEE/P7-6
- xv. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, "Heat Storage for Stable Electricity Generation: A Quantitative Scenario Analysis with Dynamic Fusion Power Plant Model," 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13), Kyoto (25 Sep. 2017): P1-156.
- xvi. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, "Plasma Control Requirements for Commercial Fusion Power Plants: A Quantitative Scenario Analysis with a Dynamic Fusion Power Plant Model," 27th IEEE Symposium On Fusion Engineering (SOFE 2017), Shanghai (7 Jun. 2017): W 63.
- xvii. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, "Environmental Life Cycle Assessment of Nuclear Fusion Biomass Gasification Plant: A Promising Option for the Sustainable Future of Humanity?," 29th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2016), Prague (5 Sep. 2016): P1.207.
- xviii. Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, "Limitation of Fusion Power Plant Installation to Future Power Grids Under the Effect of Renewable and Nuclear Power Sources," The 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-12), Jeju (15 Sep. 2015): P2.163.
- xix. Satoshi Konishi, Shutaro Takeda, Yasushi Yamamoto and Ryuta Kasada, “Fusion Deployment Scenario Considering Future Energy System with an Innovative Electricity Storage,” ANS 21st Topical Meeting: Technology Of Fusion Energy (TOFE 2014), Anaheim, CA (12 Nov. 2014): P2.

- 国内学会等 筆頭発表

(口頭発表)

- xx. Shutaro Takeda, Satoshi Konishi, Ryuta Kasada and Shigeki Sakurai, “Nuclear Fusion Biomass Gasification Plant: A Promising Option for the Sustainable Future of Humanity?,” Fifth International Symposium on Human Survivability, Kyoto (21 Nov. 2016).
- xxi. 武田秀太郎, “若手の立場から; 核融合発電の研究開発を担う核融合コミュニティの活性化に向けて,” 第 11 回 核融合エネルギー連合講演会, 福岡 (14 Jul. 2016): 14S24.
- xxii. 武田秀太郎, 笠田竜太, 小西哲之, “将来電力市場における小型核融合炉: 先進国・途上国それぞれにおける優位性と劣位性,” 第 32 回 プラズマ・核融合学会年会, 名古屋 (26 Nov. 2015): インフォーマルミーティング 9.
- xxiii. 武田秀太郎, 小西哲之, 笠田竜太, 櫻井繁樹, 山本靖, “核融合炉の電力網への導入限界の評価を目的とした電力網安定性ダイアグラムとその応用による導入戦略の考察,” 第 32 回 プラズマ・核融合学会年会, 名古屋 (25 Nov. 2015): 25pC10.
- xxiv. Shutaro Takeda, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada, Satoshi Konishi and Shigeki Sakurai, “A Simulation-based Quantitative Analysis of Limitation on Fusion Power Plant Installation to Future Power Grids,” Fourth International Symposium on Human Survivability, Kyoto (11 Nov. 2015).
- xxv. 武田秀太郎, 小西哲之, 笠田竜太, 櫻井繁樹, 山本靖, “動的シミュレーションによる核融合炉の電力網導入限界の定量的評価,” 第 11 回日本原子力学会関西支部若手研究発表会, 大阪 (29 Oct. 2015): 2.
- xxvi. 武田秀太郎, 小西哲之, 笠田竜太, 櫻井繁樹, 山本靖, “革新的電力貯蔵装置による将来電力市場への原子力導入に関する考察; (1) 海洋を用いた革新的電力貯蔵装置と原子力による電力系統への影響,” 日本原子力学会 2015 年春の年会, 日立 (20 Mar. 2015): D01.
- xxvii. 武田秀太郎, 小西哲之, 笠田竜太, “ゼロエミッションを目指した「核融合炉 + 海洋インバースダム」構想,” ZE 会合インフォーマルミーティング「核融合研究開発のブレークスルーはどこにあるか?」, 宇治 (21 Jan. 2015): 9.

(ポスター発表)

- xxviii. 武田秀太郎, 笠田竜太, 櫻井繁樹, 小西哲之, “核融合バイオマス燃料化プラントのライフサイクルアセスメントによる環境影響評価,” 第 33 回 プラズマ・核融合学会年会, 仙台 (29 Nov. 2016): 29aP-PD3.
- xxix. 武田秀太郎, 櫻井繁樹, 山本靖, 笠田竜太, 小西哲之, “ライフサイクルコスト試算に基づく電力自由化時代における原型炉戦略の考察,” 第 11 回 核融合エネルギー連合講演会, 福岡 (15 July 2016): 15P003.
- xxx. 武田秀太郎, 笠田竜太, 小西哲之, “バイオマス核融合炉のライフサイクルアセスメントによる環境への影響評価,” 第 6 回原型炉設計プラットフォーム会合, 六ヶ所 (15 Dec. 2015): #1.
- xxxi. Shutaro Takeda, Ryuta Kasada, Satoshi Konishi and Shigeki Sakurai, “An innovative liquid fuel production system through nuclear fusion,” 京都大学博士課程教育リーディングプログラム合同ワークショップ 2015, 京都 (18 Jun. 2015): A01-01.
- xxxii. 武田秀太郎, 小西哲之, 櫻井繁樹, 笠田竜太, 山本靖, “電力需給制御シミュレータに基づいた DEMO 炉運用に際する我が国 2040 年電力システムの安定性評価,” 日本原子力学会 2015 年春の年会, 日立 (21 Mar. 2015): 2-3.
- xxxiii. 武田秀太郎, 小西哲之, 山本靖, 笠田竜太, “核融合炉を含んだ小規模系統安定用蓄電装置についてのシミュレーションによる評価,” 第 5 回原型炉設計プラットフォーム会合, 六ヶ所 (10 Dec. 2014): #4.

- その他執筆

- xxxiv. 武田秀太郎, “第 33 回プラズマ・核融合学会年会 核融合若手インフォーマルミーティング会議報告,” Journal of Plasma and Fusion Research, Vo. 93, No.3 (2017): 157.

- 研究歴・職歴等

- xxxv. 特別研究員 (DC1), 工学, 日本学術振興会 (Apr. 2016 – Mar. 2018).
- xxxvi. 青年海外協力隊, 平成 27 年 9 次隊 バングラデシュ人民共和国派遣(コミュニティ開発), 独立行政法人国際協力機構 (Jul. 2015 – Aug. 2015).

- 外部研究資金等

- xxxvii. 特待生奨励金, 京都大学大学院思修館 (Apr. 2014 – Mar. 2016).
- xxxviii. 科研費, 特別研究員奨励費 (課題番号 16J11105) (Apr. 2016 – Mar. 2018).

- 受賞等

- xxxix. PhD Poster Prize, 29th Symposium on Fusion Technology, Prague, Czech Republic (Sep. 2016).
- xl. Key Scientific Article, Renewable Energy Global Innovations, Ontario, Canada (Feb. 2016).
- xli. 関西支部賞 (奨励賞), 第 11 回日本原子力学会関西支部若手研究発表会, 大阪 (Oct. 2015).
- xlii. 最優秀賞, 日本原子力学会 2015 春の年会 学生ポスターセッション, 日立 (Mar. 2015).
- xliii. 激励賞, 京都大学学際研究着想コンテスト 2014, 京都 (Aug. 2014).

# 参考文献

1. 中田力, いち・たす・いち (*脳方程式*). 2001, 東京: 紀伊國屋書店.
2. 中田力, *脳方程式* ふらす・あるふぁ. 2002, 東京: 紀伊國屋書店.
3. 小西哲之, *人類生存の持続可能性*. 2017, 公益財団法人国際高等研究所: 京都. p. 7.
4. Jevons, W.S., *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. 1906: Macmillan.
5. Marchetti, C., *How to solve the CO2 problem without tears*. International Journal of Hydrogen Energy, 1989. **14**(8): p. 493-506.
6. IEA, *World Energy Outlook 2016*. 2016, OECD: Paris.
7. Stocker, T., *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014: Cambridge University Press.
8. Howard, J.N. and D.L. Burch, *Near-infrared transmission through synthetic atmospheres*. 1955, AIR FORCE CAMBRIDGE RESEARCH LABS LG HANSCOM FIELD MASS.
9. Browne, E., J.M. Dairiki, and R.E. Doebler, *Table of isotopes*. 1978, NATIONAL STANDARD REFERENCE DATA SYSTEM.
10. Ueda, Y., T. Inoue, and K. Kurihara, *Intelligible Seminar on Fusion Reactors - (1) Introduction to Fusion Reactors*. 日本原子力学会誌, 2004. **46**(12): p. 27-34.
11. Bradshaw, A.M., T. Hamacher, and U. Fischer, *Is nuclear fusion a sustainable energy form?* Fusion Engineering and Design, 2011. **86**(9-11): p. 2770-2773.
12. Oliphant, M., P. Harteck, and L. Rutherford, *Transmutation effects observed with heavy hydrogen*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1934. **144**(853): p. 692-703.

13. Arnoux, R. *Who invented fusion*. ITER NEWSLINE 2014 [cited 2017; Available from: <https://www.iter.org/newsline/-/1836>].
14. 核融合原型炉研究開発の推進に向けて. 2017, 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会: Tokyo.
15. 高度情報科学技術研究機構. *ATOMICA:核融合炉工学の研究開発課題 (1) プラズマ加熱工学*. 2005; Available from: [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_Key=07-05-02-01](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=07-05-02-01).
16. 高度情報科学技術研究機構. *ATOMICA:核融合炉工学の研究開発課題 (2) 超伝導コイル*. 2005; Available from: [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_Key=07-05-02-02](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=07-05-02-02).
17. 高度情報科学技術研究機構. *ATOMICA:核融合炉工学の研究開発課題 (6) 材料工学*. 2005; Available from: [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_Key=07-05-02-06](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=07-05-02-06).
18. 高度情報科学技術研究機構. *ATOMICA:核融合炉工学の研究開発課題 (10) 安全工学*. 2005; Available from: [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_Key=07-05-02-10](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=07-05-02-10).
19. 広辞苑 第七版, ed. 新村出. 2018, 岩波書店: Tokyo.
20. デジタル大辞泉. 2017, 小学館: Tokyo.
21. Davis, F.D., R.P. Bagozzi, and P.R. Warshaw, *User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models*. Management science, 1989. **35**(8): p. 982-1003.
22. Burenhult, G., *The first humans: human origins and history to 10,000 BC*. Vol. 1. 1993: Harper San Francisco.
23. Berna, F., et al., *Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012. **109**(20): p. E1215-E1220.
24. Alam, M., et al., *A model for the quality of life as a function of electrical energy consumption*. Energy, 1991. **16**(4): p. 739-745.

25. Pasternak, A.D., *Global energy futures and human development: a framework for analysis*. US Department of Energy, Oak Ridge, 2000.
26. IEA, *World Energy Outlook 2015*. 2015, OECD: Paris.
27. IEA, *Key World Energy Statistics 2017*, OECD: Paris.
28. 電力・エネルギービジネス総覧. 電力システム改革シリーズ. 2014, 日経 BP グリーンテック研究所: Tokyo.
29. *Regional Transmission Organizations (RTO)/Independent System Operators (ISO)*. 2017 [cited 2017; Available from: <https://www.ferc.gov/industries/electric/indus-act/rto.asp>].
30. *World Nuclear Performance Report 2017*. 2017, World Nuclear Association: London.
31. Takeda, S., et al., *Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Small-Scale Electrical Grids*. Fusion Science and Technology, 2017. **68**(2): p. 341-345.
32. *International Energy Statistics*. 2014, U.S. Energy Information Administration: Washington D.C.
33. IEA, *World Energy Outlook 2013*. 2013, OECD: Paris.
34. Takeda, S., et al., *Limitation of fusion power plant installation on future power grids under the effect of renewable and nuclear power sources*. Fusion Engineering and Design, 2016. **109-111**: p. 1754-1758.
35. IEA, *World Energy Outlook 2014*. 2014, OECD: Paris.
36. 岡本浩. 低炭素化に向けた電力システムの方向性と課題. 2017 [cited 2017; Available from: <http://www.env.go.jp/press/y0618-18/mat01.pdf>].
37. 石亀篤司, *電力システム工学*. 2013, オーム社: Tokyo.
38. 新エネ部会電力系統影響評価検討小委中間報告書. 2000, MITI: Tokyo.
39. 松下郷志, et al., *電力品質に関する動向と将来展望電力品質に関する動向と将来展望, 2000*.
40. *Emergency and Normal Times Frequency Control on Electrical Grid 2002*, Tokyo: Institute of Electrical Engineers of Japan.

41. 入江寛, 大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御. 2009, University of Tokyo: Tokyo.
42. Tabata, Y., *Investigation into Load Characteristics of Stand-alone Equipment (Household Electric Appliances)*. 中部電力技術開発ニュース, 2000. **11**(87): p. 11-12.
43. 佐々木鉄雄, 競争環境に対応した負荷周波数制御とその評価指標に関する研究. 2003, Kyoto University: Kyoto.
44. Kamada, Y., *Intelligible Seminar on Fusion Reactors - (2) Introduction of Plasma Characteristics for Fusion Reactor Design*. 日本原子力学会誌, 2005. **47**(1): p. 45-52.
45. *Nuclear Fusion Research in the World - The Frontier of Nuclear Fusion Research*. [cited 2017; Available from: <http://soken.nifs.ac.jp/wp/en/about/>].
46. ITER. *WHAT IS ITER? - ITER Website*. [cited 2017; Available from: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>].
47. ITER. *ITER Tokamak and Plant Systems*. 2016; Available from: <https://www.iter.org/album/media/>.
48. Konishi, S. and M. Enoeda, *Intelligible Seminar on Fusion Reactors - (6) Blanket that converts energy, and produces fuels*. 日本原子力学会誌, 2005. **47**(7).
49. Ishiyama, S., *2. Basis of Heat Engine*. J. Plasma Fusion Res., 2017. **93**(4): p. 200-204.
50. *Text - Fusion Reactors - Tokamak Reactor Designs and their Basis on Plasma Physics and Reactor Technology* -. Journal of Plasma and Fusion Research, ed. JSPF. Vol. 87 Supplement. 2011, JSPF: Nagoya.
51. Kobori, H., et al., *Improvement of system code importing evaluation of Life Cycle Analysis of tokamak fusion power reactors*. Fusion Engineering and Design, 2016. **109**: p. 760-763.
52. Tokimatsu, K., et al., *Evaluation of CO2 emissions in the life cycle of tokamak fusion power reactors*. Nuclear fusion, 2000. **40**(3Y): p. 653.

53. 内山洋司, 発電システムのライフサイクル分析, in 電力中央研究所報告 Y94009. 1995, CRIEPI: Tokyo.
54. Ohira, S., *Intelligible Seminar on Fusion Reactors - (11) Safety of Fusion Reactor - Safety Characteristics and Requirements -*. 日本原子力学会誌, 2005. 47(12): p. 839-845.
55. IAEA, *IAEA Safeguards Glossary, 2001 Edition*. 2002, IAEA: Vienna.
56. Goldston, R.J., A. Glaser, and A.F. Ross, *Proliferation Risks of Fusion Energy: Clandestine Production, Covert Production, and Breakout*, in *9th IAEA Technical Meeting on Fusion Power Plant Safety*. 2009, IAEA: Vienna.
57. Gsponer, A. and J.-P. Hurni, *ITER: The International Thermonuclear Experimental Reactor and the Nuclear Weapons Proliferation Implications of Thermonuclear Fusion Energy Systems*. 2008, Geneva: Independent Scientific Research Institute.
58. Asaoka, Y., R. Hiwatari, and K. Okano, *Conceptual Study on Demonstration Reactor, Demo-CREST, for Development Strategy of Fusion Power Reactor (1)*. Komae Research Laboratory Rep. No. T03008. 2004, CRIEPI: Tokyo.
59. 朝岡善幸, et al., *28pC21P Demo-CREST: 早期核融合発電実証炉の概念検討 (2): 工学設計の概念検討 (加熱・炉設計・炉システム)*. プラズマ・核融合学会年会予稿集, 2002(19): p. 183.
60. 日渡良爾, et al., *28pC20P Demo-CREST: 早期核融合発電実証炉の概念検討 (1): 設計パラメータの最適化 (加熱・炉設計・炉システム)*. プラズマ・核融合学会年会予稿集, 2002(19): p. 182.
61. Hiwatari, R., Y. Asaoka, and K. Okano, *Development Step toward Fusion Power Plant and Role of Experimental Reactor ITER*. Nuclear Technology Research Laboratory Rep. No. L04. 2005, CRIEPI: Tokyo.
62. Hiwatari, R., et al., *Analysis of critical development issues towards advanced tokamak power plant CREST*. Nuclear fusion, 2007. 47(5): p. 387.
63. Hiwatari, R., et al. *Engineering design of demo-CREST and analysis on critical development issues toward advanced tokamak power plant CREST*. in *Proc. of*

- The 21st IAEA Fusion Energy Conference, FT/P5-25, Chengdu, China (2006-10)*. 2006.
64. Tobita, K., et al., *Conceptual design of the SlimCS fusion DEMO reactor*. 2010, Japan Atomic Energy Agency: Naka.
  65. Tobita, K., et al., *SlimCS—compact low aspect ratio DEMO reactor with reduced-size central solenoid*. *Nuclear Fusion*, 2007. **47**(8): p. 892.
  66. Federici, G., et al., *Overview of EU DEMO design and R&D activities*. *Fusion Engineering and Design*, 2014. **89**(7): p. 882-889.
  67. Federici, G., et al., *Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO*. *Fusion Engineering and Design*, 2016. **109**: p. 1464-1474.
  68. Bubelis, E. and W. Hering, *Report on conceptual designs of PHTS, ESS and PCS componesnts for DEMO BoP with helium cooled BB and water cooled BB concepts, EUROfusion WPBoP*. 2015.
  69. Boccaccini, L., et al., *Power extraction and tritium self-sufficiency*. *Magnetic Fusion Energy: From Experiments to Power Plants*, 2016: p. 61.
  70. Herrmann, U., B. Kelly, and H. Price, *Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants*. *Energy*, 2004. **29**(5-6): p. 883-893.
  71. Mizuguchi, N., Y. Suzuki, and N. Ohyabu, *Nonlinear Simulation of Collapse Phenomenon in Helical Plasma with a Large Pressure Gradient*. *Plasma and Fusion Research*, 2008. **3**: p. S1034-S1034.
  72. Yoshino, R., *Prediction of Major Disruptions in Tokamak Plasmas, Analyses of Time Series Data*. The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, 2006. **82**(5): p. 294-299.
  73. Kawano, Y., M. Sugihara, and K. Tobita, *Controlling of Disruption - Progress in Physics Understanding and Control Techniques*. *J. Plasma Fusion Res.*, 2010. **86**(1): p. 3-16.
  74. Wesson, J.A., *Sawtooth reconnection*. *Nuclear Fusion*, 1990. **30**(12): p. 2545.

75. Kawano, Y., et al., *Tangential CO<sub>2</sub> Laser Interferometer for Large Tokamaks*. J. Plasma Fusion Res., 1997. **73**(8): p. 870-891.
76. 核融合エネルギーの技術的実現性・計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書. 2000, 原子力委員会核融合開発戦略検討分科会: Tokyo.
77. Hiwatari, R., *2. System Designs for a Tokamak Fusion Reactor*. J. Plasma Fusion Res., 2011. **87**(9): p. 622-627.
78. 河野康則, 杉原正芳, and 飛田健次, *ディスラプションを制御する～物理現象の理解と制御技術の進展*. プラズマ・核融合学会誌, 2010. **86**(1): p. 3-16.
79. Hender, T., et al., *MHD stability, operational limits and disruptions*. Nuclear fusion, 2007. **47**(6): p. S128.
80. Hoshino, K., et al., *Avoidance of  $q = 3$  disruption by electron cyclotron heating in the JFT-2M tokamak*. Physical review letters, 1992. **69**(15): p. 2208.
81. Salzedas, F., A. Oomens, and F. Schüller, *The effect of ECRH on the stability of the radiation induced  $m = 2$  mode and on the current quench of a major disruption*. Nuclear fusion, 2002. **42**(7): p. 881.
82. *Operation Data of a PWR Plant: Unpublished data, provided by courtesy of a power company under condition of anonymity*.
83. Someya, Y., et al. *Study on the decay heat removal during maintenance for fusion DEMO reactor*. in *The 29th Annual Meeting of The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research*. 2012. Fukuoka.
84. Harrington, C., *Dynamic modelling of balance of plant systems for a pulsed DEMO power plant*. Fusion Engineering and Design, 2015. **98-99**: p. 2147-2151.
85. Kiviluoto, S., et al. *Integrated System Level Simulation and Analysis of DEMO with Apros*. in *Nuclear Science and Technology Symposium - NST2016*. 2016. Helsinki, Finland.
86. Malinowski, L., M. Lewandowska, and F. Giannetti, *Analysis of the secondary circuit of the DEMO fusion power plant using GateCycle*. Fusion Engineering and Design, 2017.

87. Takeda, S., et al., *Plasma Control Requirements for Commercial Fusion Power Plants: A Quantitative Scenario Analysis With a Dynamic Fusion Power Plant Model*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018. **PP(99)**: p. 1-6.
88. Takeda, S., et al., *Environmental Life Cycle Assessment of High Temperature Nuclear Fission and Fusion Biomass Gasification Plants*. Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, 2017: p. 17582-17582.
89. 内閣府, 官報号外政府調達第 12 号, 内閣府, Editor. 2017, 国立印刷局: Tokyo. p. 63.
90. Casella, F. and A. Leva, *Modelling of thermo-hydraulic power generation processes using Modelica*. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2006. **12(1)**: p. 19-33.
91. Casella, F. and A. Leva. *Modelica open library for power plant simulation: design and experimental validation*. in *3rd International Modelica Conference*. 2003. Linköping.
92. Tanaka, S., et al., *Present Status of ITER Test Blanket Development*. J. Plasma Fusion Res., 2005. **81(6)**: p. 434-450.
93. Haynes, W.M., *CRC handbook of chemistry and physics*. 2014: CRC press.
94. Hirose, T., et al., *Physical properties of F82H for fusion blanket design*. Fusion Engineering and Design, 2014. **89(7)**: p. 1595-1599.
95. Enoeda, M., et al., *Design and technology development of solid breeder blanket cooled by supercritical water in Japan*. Nuclear Fusion, 2003. **43(12)**: p. 1837.
96. Van der Laan, J. and R. Muis, *Properties of lithium metatitanate pebbles produced by a wet process*. Journal of nuclear materials, 1999. **271**: p. 401-404.
97. Tsuru, D., et al., *Achievements in the development of the water cooled solid breeder test blanket module of Japan to the milestones for installation in ITER*. Nuclear Fusion, 2009. **49(6)**: p. 065024.

98. Takase, K., et al., *Temperature distributions in a Tokamak vacuum vessel of fusion reactor after the loss-of-vacuum events occurred*. Fusion engineering and Design, 1998. 42(1-4): p. 83-88.
99. Tanigawa, H., et al., *Natural Convection Cooling of Decay Heat in Fusion DEMO Reactor*, in *33rd JSPF Annual Meeting*. 2016: Sendai.
100. *Overview of Light Water Nuclear Power Stations*. 2010, Tokyo: Nuclear Safety Research Association.
101. 高度情報科学技術研究機構. *ATOMICA:PWR の蒸気発生器*. 1998; Available from: [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_No=02-08-01-03](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=02-08-01-03).
102. *軽水炉発電所のあらまし*. 1993, 原子力安全研究協会: Tokyo.
103. *INCONEL alloy 690 Catalog*, in *Publication Number SMC-079*. 2004, Special Metals Corporation: Hereford.
104. *Catalog: Stainless Steel*, in *SANYO SPECIAL STEEL - the Confident Choice*. 2007, SANYO SPECIAL STEEL: Hyogo.
105. *福井県の原子力 別冊本編 第1章原子力発電の現状*. [cited 2017; Available from: <http://www.athome.tsuruga.fukui.jp/nuclear/information/fukui/index.html>.
106. Testa, D. and A. Kunkle, *The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant*. Westinghouse Electric Corporation Water Reactor Divisions, 1984.
107. 原型炉の計装制御に関する研究会報告書編集委員会, *NIFS-MEMO-68 核融合原型炉の計装制御*, in *NIFS-MEMO Series*. 2014, NIFS: Toki.
108. 恒川明大, et al., *電中研電力系統安定度解析システム Y法 S法プログラム解説書*. 2001, CRIEPI: Tokyo.
109. Group, P.S.S.S., *Integrated Analysis Software for Bulk Power System Stability*. 1990, CRIEPI: Tokyo.
110. Murakami, A., A. Yokoyama, and Y. Tada, *Basic Study on Battery Capacity Evaluation for Load Frequency Control (LFC) in Power System with a Large*

- Penetration of Wind Power Generation*. IEEJ Trans. PE, 2006. **126**(2): p. 236-242.
111. 大屋慎次, マイクログリッドの制御可能電源による系統受給制御への貢献に関する研究. 2008, University of Tokyo: Tokyo.
  112. 高尾英伸, 電力システムへの影響解析による核融合発電の導入条件の研究. 2005, Kyoto University: Kyoto.
  113. Lampasi, A., et al., *IPSE DIXIT: A User-Friendly Software Tool for the Design and Operation of Tokamak Power Supplies*, in *27th IEEE Symposium On Fusion Engineering*. 2017: Shanghai.
  114. Wang, H. and W. Du, *A Single-Machine Infinite-Bus Power System Installed with a Power System Stabilizer*, in *Analysis and Damping Control of Power System Low-frequency Oscillations*. 2016, Springer. p. 17-79.
  115. Bhatti, T. and D. Hill, *A multimachine Heffron-Phillips model for power systems with frequency-and voltage-dependent loads*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1990. **12**(3): p. 171-182.
  116. Shanechi, M.H.M. and M.O. Buygi, *A Generalized Heffron-Phillips Model for Multi-Machine Power Systems with Voltage and Frequency Dependent Loads*. Electric Power Components and Systems, 2001. **29**(5): p. 389-404.
  117. 気象庁. *過去の気象データ・ダウンロード*. 2015 [cited 2015; Available from: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>].
  118. NEDO. *日本における風力発電設備・導入実績の一覧表*. 2014; Available from: <http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/reference.html>.
  119. NEDO. *太陽光発電システムの普及動向に関する調査*. 2013 [cited 2013; Available from: [http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2013fy/E002502.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002502.pdf)].
  120. Hummon, M., et al. *Sub-hour solar data for power system modeling from static spatial variability analysis*. in *2nd International Workshop on Integration of Solar Power in Power Systems Proceedings, Lisbon, Portugal*. 2012.
  121. Vestas. *V90-1.8/2.0 MW® at a Glance*. 2015 [cited 2015; Available from: [https://www.vestas.com/en/products\\_and\\_services/turbines/v90-2\\_0\\_mw](https://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v90-2_0_mw)].

122. Masaki, Y., T. Kuwagata, and Y. Ishigooka, *Precise estimation of hourly global solar radiation for micrometeorological analysis by using data classification and hourly sunshine*. Theoretical and Applied Climatology, 2009. **100**(3-4): p. 283-297.
123. Erbs, D., S. Klein, and J. Duffie, *Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation*. Solar energy, 1982. **28**(4): p. 293-302.
124. JIS, *C 8907*. 2005.
125. Takeda, S., *Impacts of Nuclear Fusion Power Plants on Society: Quantitative Assessment of the Adverse Effects of Sudden Output Interruptions of Fusion Plants*. 2016, Kyoto University: Kyoto.
126. Onega, R.J., W. Becraft, and E. Bettis, *Major plasma disruptions in TNS*. 1979, Oak Ridge National Lab., TN (USA).
127. Yoshino, R., *Neural-net disruption predictor in JT-60U*. Nuclear fusion, 2003. **43**(12): p. 1771.
128. Bakhtiari, M., et al., *Fast plasma shutdown scenarios in the JT-60U tokamak using intense mixed gas puffing*. Nuclear Fusion, 2002. **42**(10): p. 1197.
129. Takeda, S., et al., *Requirements for DEMO from the Aspect of Mitigation of Adverse Effects on the Electrical Grid*. Plasma and Fusion Research, 2015. **10**: p. 1205070-1205070.
130. Akaike, H., *A new look at the statistical model identification*. IEEE transactions on automatic control, 1974. **19**(6): p. 716-723.
131. Kutomi, Y., et al., *Export of High Performance & High Quality Components*. 三菱重工技報, 2006. **43**(3): p. 32-36.
132. *MEPS - WORLD STAINLESS STEEL PRICES - \$US/metric ton*. 2017 [cited 2017; Available from: <http://www.meps.co.uk/Stainless%20Prices.htm>].
133. Tribe, M. and R. Alpine, *Scale economies and the "0.6 rule"*. Engineering Costs and Production Economics, 1986. **10**(1): p. 271-278.

134. *Expenditures for Installation - San Onofre Nuclear Generating Station Units 2 & 3 Replacement Steam Generators and Disposal of Original Steam Generators (U 338-E)(SCE-6)*. 2013, Southern California EDISON: Rosemead.
135. Ibrahim, H., A. Ilinca, and J. Perron, *Energy storage systems—Characteristics and comparisons*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**(5): p. 1221-1250.
136. Chen, H., et al., *Progress in electrical energy storage system: A critical review*. Progress in Natural Science, 2009. **19**(3): p. 291-312.
137. 石川容平, 発電システムおよび発電方法(特開 2014-51970). 2014: 日本国特許庁.
138. Roberts, B.P. *Sodium-Sulfur (NaS) batteries for utility energy storage applications*. in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. 2008. IEEE.
139. Poonpun, P. and W.T. Jewell, *Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity*. IEEE Transactions on energy conversion, 2008. **23**(2): p. 529-534.
140. Oudalov, A., et al. *Value analysis of battery energy storage applications in power systems*. in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*. 2006. IEEE.
141. Hiwatari, R., *4. System Designs of Fusion Reactor and its Economic Analysis*. J. Plasma Fusion Res. , 2011. **87**(9): p. 633-639.
142. Sheffield, J., et al., *Cost assessment of a generic magnetic fusion reactor*. Fusion Technology, 1986. **9**(2): p. 199-249.
143. Delene, J., et al., *Generomak: Fusion physics, engineering and costing model*. 1988, Oak Ridge National Lab.: Tennessee.
144. Goto, T., *2. Find the Design Point of Fusion Reactors*. Journal of Plasma Fusion Research, 2016. **92**(8): p. 558-592.
145. Yoshida, T., et al., *Development of Cost Assessment Code for Fusion Power Reactors*, in *CRIEPI Research Report T94001*. 1994, CRIEPI: Tokyo.

146. Hiwatari, R., et al., *Generation of net electric power with a tokamak reactor under foreseeable physical and engineering conditions*. Nuclear fusion, 2003. 44(1): p. 106.
147. Tokimatsu, K., et al., *Studies of breakeven prices and electricity supply potentials of nuclear fusion by a long-term world energy and environment model*. Nuclear Fusion, 2002. 42(11): p. 1289.
148. IEA, *Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition*. 2015, OECD: Paris.
149. *PJM Manual 06: Financial Transmission Rights, Revision: 19*. 2017, PJM: Audubon.
150. *PJM Manual 18: PJM Capacity Market, Revision: 38*. 2017, PJM: Audubon.
151. *PJM Manual 11: Energy & Ancillary Services Market Operations, Revision: 92*. 2017, PJM: Audubon.
152. *Energy Market. Market & Operations 2017* [cited 2016; Available from: <http://www.pjm.com/markets-and-operations/energy.aspx>].
153. 容量市場は果たして機能するか？～米国 PJM の経験から考える その1～. 2012, International Environmental Economic Institute: Tokyo.
154. 矢島正之, *カリフォルニア州の電力危機と PJM の概要*. 2002, 資源エネルギー庁電気事業分科会資料: Tokyo.
155. Itoh, Y., *Electric Power Market Price Analysis for Trading Risk Management*. TOSHIBA Review, 2005. 60(11): p. 58-61.
156. *End-of-Day Data, CME Group Datamine*. 2017 [cited 2017; Available from: <http://www.cmegroup.com/market-data/datamine-historical-data.html>].
157. *EODData, success through information*. 2017 [cited 2017; Available from: <http://eoddata.com/default.aspx>].
158. *PJM Manual 27: Open Access Transmission Tariff Accounting, Revision: 88*. 2017, PJM: Audubon.
159. 送電・系統運用部門の公平性担保のための方策についてー同時同量・インバランサー, in *電気事業分科会資料*. 2007, 経済産業省資源エネルギー庁: Tokyo.

160. 新谷隆之, *PJM 市場における DR プログラム～PJM の卸電力市場と DR の関係、および収益性の考察～*. インターテックリサーチレポート, 2013. **28**.
161. Hiwatari, R., *1. Overview of Fusion Reactor Conceptual Design Supported by Design Tools*. Journal of Plasma Fusion Research, 2016. **92**(8): p. 585-587.
162. Oshima, T., M. Kajita, and A. Okuno, *Development of Sodium - Sulfur Batteries*. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2004. **1**(3): p. 269-276.
163. *円借款供与条件表 (平成 29 年 10 月 16 日以降に事前通報を行う案件に適用)*. 2017, JICA: Tokyo.