

核融合炉が拓く 30 年後の未来社会に向けて

Let's create our future with fusion reactor

執筆者プロフィール



◎1998 年東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻博士前期課程修了、2001 年京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻博士後期課程修了、博士（エネルギー科学）

◎主として行っている業務・研究テーマ：エネルギー材料学、核融合工学

◎京都大学エネルギー理工学研究所 准教授
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄／
E-mail: r-kasada@iae.kyoto-u.ac.jp)

笠田 竜太

Rvuta KASADA

1. はじめに

妙心寺の法堂の天井には、狩野探幽による雲龍図が描かれています^[1]。龍神が水を司ることから、仏法の慈雨を降らすという意味や、火災除けの意味が込められていると説明されています。私がこの雲龍図を拝観した際には、中心に構える「八方にらみの龍」の恐ろしい視線を避けてか、龍を囲うように配置された円、禅語で言うところの「円相」に目が向きました。荒々しい龍といえども円相が象徴する仏法に封じ込められてしまうと一般には解釈されるのかもしれませんが、私には荒ぶる高温高压プラズマを閉じ込める核融合炉の姿が想起されました。核融合反応が生じるプラズマについては雷雲を纏う龍に、核融合エネルギーを受け止めるブランケットのような炉内機器や、プラズマの磁場閉じ込め方式に用いる超伝導コイルあるいは慣性閉じ込め方式に用いる高出力レーザー装置などを多重の円相に、それぞれ見立てたわけです。

私にとっての核融合研究は、その一円を担う機器であるブランケットの構造材料として開発されている低放射化鉄鋼材料の中性子照射効果に関する研究から始まりました。本稿では、エネルギーと核融合と私自身のこれまでの 30

年とこれからの 30 年に向けた状況を踏まえて、核融合炉とともにある 30 年後の未来について述べたいと思います。

2. エネルギーと核融合と私のこれまでの 30 年

30 年後の核融合エネルギーについて語る前に、30 年前の日本のエネルギー事情を振り返り、現在への影響を考えることは、将来において解決すべきエネルギー問題と望ましい社会像から現在の核融合エネルギーを含めたエネルギー研究開発が何をすべきかを考える上で有益と思われます。そこで、1986 年（昭和 61 年）頃のエネルギー事情を簡単に振り返ってみましょう。

1986 年はバブル景気が始まったとされる年です。朝シャンなる言葉の流行や、家庭用ゲームのスーパーマリオブラザーズの大ヒットに象徴されるように、多様化するライフスタイルと娯楽に大量のエネルギーが費やされ始めた年とも言えるでしょう。この年に家庭部門での 1 世帯あたりの電力使用量は月平均 210kWh を越え、バブル崩壊後も 1996 年頃まで急速に増加し続けます^[2]。

電力供給技術に関しても 30 年前には象徴的な出来事が数多く見られます。原子力発電については、新規に営業運転を開始した商用炉の数が 1985 年にピークを迎えた直後である一方で、翌年にはチェルノブイリ原子力発電所の事故が起きました。高速増殖炉もんじゅの本体工事が着工したのも 1985 年のことです。火力発電については、1986 年に石炭ガス化複合発電のパイロットプラント試験が開始しています。新エネルギーや省エネルギー技術の開発については、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を中心に国策として推進された時期でもあります。

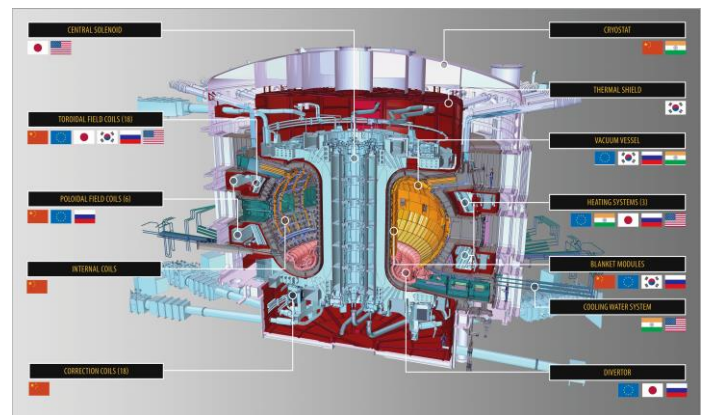


図 1 ITER の本体の概略図（ITER 機構提供）

核融合エネルギーの研究開発については、原子力委員会が定めた第二段階核融合研究開発基本計画の中核装置とし

てJT-60 トカマク装置が1985年に運転を開始するとともに、同年の米ソ首脳会談においてレーガン大統領とゴルバチョフ書記長による核融合研究の平和利用のための国際協力に関する合意を受けて、核融合実験炉 ITER（図1）の概念設計活動が1988年に開始する目前のところでした。その後1989年には核融合科学研究所が設立されて、我が国の大学における核融合研究の共同利用機関として中核的な役割を担い始める前夜でもありました。

このように、我が国においては、30年前は増加し続けるエネルギー需要に対応するとともに、不確定な未来におけるエネルギー供給の不確実性をリスクとして設定し、核融合を含めたありとあらゆるエネルギー供給技術の研究開発の促進をリスクに対する保険として展開し始めた時期であったと言えるでしょう。

さて、30年前の私はというと、夜空に輝く星々を眺め、その輝きが核融合によるものだと知った小学生以来、言葉通りの「中二病」の真最中であり（今も？）、核融合研究者を目指し始めた頃でもありました。当時放映していた人気テレビアニメの「機動戦士ガンダム」シリーズは、そんな私にとっても刺激的な作品でした。ガンダムをはじめとするモビルスーツ（作品中の有人ロボット兵器の総称）の動力源が重水素とヘリウム3を燃料とする「ミノフスキー・イオネスコ型核融合炉」であることは、私と同世代のメカ屋には常識と言っても良い設定でしょう^[3]。続編の「機動戦士Ζガンダム」では、ヘリウム3を採取するための木星船団の存在が物語の重要な役割を担っていますが、現実には研究開発が進められている核融合炉では、燃料として重水素と三重水素を用いるため、木星船団の完成を待つ必要はありません。ただし、重水素が海水中に多量に存在するのに対して、三重水素は天然にはほとんど存在しません。そこで、重水素と三重水素の核融合反応によって生じる中性子を、炉心周囲に設置したブランケットと呼ばれる炉内機器に置いたりチウムに当てることによって、三重水素を自己生産するというアイデアが採用されています。

中性子の照射を受けてブランケットで発生した核熱は、高温高压水のような冷却媒体によって運ばれ発電のための熱エネルギーとして用いられます。よって、ブランケットの構造材料は、高温・腐食環境に加えて中性子照射による損傷を受けるといった過酷な環境で用いられることになるのです。私にとっての核融合研究は、ブランケット構造材料の第一候補材である低放射化フェライト鋼の中性子照射効果を明らかにするための基礎研究から始まり、最近では、核融合中性子による材料の照射効果をイオン照射法で模擬し、その機械的特性変化をナノインデンテーション法によって評価する手法の開発等に展開しています^[4]。巨大な核融合炉の実現のためには、このような微小な機械・材料に関する研究も重要な役割を担えるところが、この分野の面白いところでもあります。

3. 核融合炉開発の今

我が国も誘致活動で最後まで競っていた核融合実験炉 ITER はフランスに建設されることが2005年に決まり、欧

州、日本、米国、インド、ロシア、中国、韓国の7極が参加して、南仏のサン・ポール・レ・デュランスの地で建設が進んでいるところです。日本へのITERの誘致は叶いませんでしたが、代わりにITER計画のみではカバーしきれない炉工学等に関する研究開発を日欧で協同する「幅広いアプローチ(BA)」活動が青森県六ヶ所村を主な拠点として実施されています。また、ITERの大多数の機器は、各国の国内機関が調達して物納することになっており、日本でも重要機器に関する研究開発と製造が着実に進んでいます。例えば、日本は図2に示すトロイダルフィールド(TF)コイルと呼ばれる1体当たり高さ16.5m、幅9m、重量約300トンの巨大なD型の超伝導磁石機器の製造を一部担当しています。TFコイルの製造には、当学会の核融合設備規格超伝導マグネット構造規格(JSME S KA1)が活用されています。



図2 ITER用TFコイルの製造（三菱重工/三菱電機提供）

現地におけるITERの建設の様子は、ITER機構のホームページで随時更新されており、国内機関からの情報発信も活発になっています^[5]。一方、実際のモノが国内にないということは、国民の理解を得る上で足枷になっているところもあります。そこで我々の研究室では、ブロックおもちゃを使って、ミニフィグ（人形）を身長1.8mの人間と見なすと同等の比率となるITER模型を建設しました（図3）。TFコイルやブランケットモジュール等の要素機器ごとにブロックの色を分けるなどのコダワリが込められているので、アウトリーチ活動としてだけではなく、建設を通して核融合炉の構造を学ぶことが出来る大学院生にとっての教育活動としても大変良い教材になっています。

TFコイルのみならず、将来の核融合原型炉に必要な機器や材料の要素技術開発の進展を「みえる化」するために、私が未だ若手研究者とカテゴライズされていた2013年に同志とともに自主的に技術成熟度を評価した結果の一部が公表されています^[6]。評価結果を率直に申しますと、これらの要素技術の中には着手はされているものの、研究室レベルの基礎研究に留まっている周辺技術や、経済的に魅力ある炉にするために革新が求められるコア技術、例えば除熱・排気用いられるダイバータシステムのような大

きな開発課題もあり、多様な分野の研究者の参加が期待されるところです。

技術成熟度評価において列記された要素技術開発を進める一方、これらの要素技術を統合化し、核融合炉として成立しうる設計を提示することも重要です。2015 年には原型炉設計活動の実行主体として、オールジャパンの精鋭を結集した「原型炉設計合同特別チーム」が量子科学研究開発機構の青森核融合研究所(六ヶ所村)に立ち上がりました。既に全国の大学や産業界から、多くの産学のエキスパートも非常勤として参画し、原型炉の運転計画、基本概念・パラメータ、原型炉システム構成機器とそれらの技術仕様、設計関連ソフトウェアの開発整備と材料データベースの構築、コスト概算、安全設計指針、放射性廃棄物の管理処分シナリオ、資源調達戦略などについて検討を進めています。一方、今後の本格的な設計段階、そして将来の建設段階に向けてより多くのメカ屋人材が必要となると考えられます。私自身も、専門は「材料屋」ではありますが、核融合炉とその周辺を見渡す総合調整グループのメンバーとして参加しているので、核融合炉と多くのメカ屋あるいはその他の研究者や技術者を繋げるための活動を積極的に展開していきたいと考えています。



図3 当研究室で建設したブロックによる ITER 模型

4. 日本と世界の核融合エネルギー開発戦略

前節までは、30 年前から現在までの核融合エネルギーをとりまく状況を振り返ってきましたが、本題の 30 年後の未来に向けて、核融合発電技術開発が国策としてどのように位置づけられているのかを紹介したいと思います。我が国の核融合研究開発のロードマップは、原子力委員会核融合専門部会報告書「今後の核融合研究開発の推進方策について」(2005 年 10 月)に記されています。ここでは、ITER から原型炉段階を経て、第一世代の商用炉を導入する戦略が示されています。その後、2015 年に文部科学省核融合科学技術委員会のもとに結成され、私も参画した「原型炉戦略タスクフォース」は、ロードマップをもとに数 10 万 kW の発電を実証する原型炉の建設に向けたアクションプランを提示しました^[7]。アクションプランが想定する核融合炉

開発計画の概要は図 4 のようになり、これに従うと 30 年後には原型炉の建設中あるいは建設完了・運転することになります^[8]。今後 30 年の原型炉計画を中心とする核融合開発における課題と解決への道筋が項目ごとに網羅されていますので、是非ご覧になってください。

さて、世界に目を向けると、我が国よりもアグレッシブに核融合炉開発を進めている国も見られます。例えば中国では、ITER 計画と平行して独自の工学試験炉である CFETR の設計報告書を上梓し、盛んに研究開発を進めています。お隣の韓国では、核融合エネルギー法を制定し、K-DEMO と呼ばれる原型炉設計活動を展開し、2037 年までにその建設を完了することが期待されています。そして ITER を誘致した EU は、全欧州規模で実施される最大規模の研究及び革新的開発を促進するためのフレームワークプログラムである HORIZON2020 において、ITER の次のステップは、2050 年までに核融合発電を可能とするために必要な DEMO の建設であることを示しています。

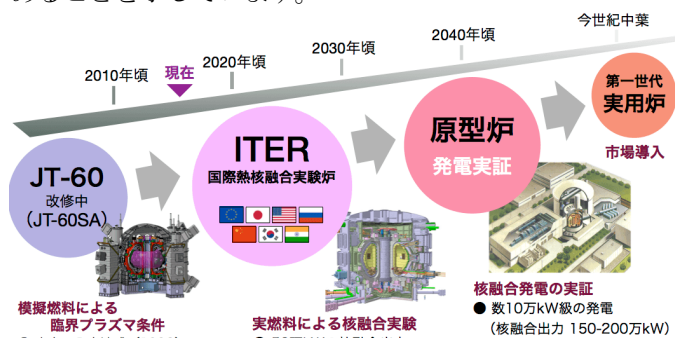


図4 アクションプランで想定される核融合炉開発計画^[8]

5. 核融合エネルギーとともにある 30 年後の未来

前節のアクションプランで示したように、我々核融合エネルギー研究コミュニティがフォアキャスティングする 30 年後は、原型炉が建設中あるいは運転を始め、発電を実証する段階ということになります。この計画を実現するためには、30 年後以降の社会やエネルギー市場が必要とすると仮定したエネルギー供給技術を前提として、そこからバックキャスティングして設定した原型炉の開発目標が、先ずは現在の社会・国民から投資するに値すると承認される必要があります。

バックキャスティングの際には、30 年前に想定した未来のエネルギー需給リスクに対する保険として承認されたのであろう ITER 計画を含む核融合エネルギー研究開発計画と、現在想定しうる 30 年後の未来のエネルギー需給におけるリスクに対する保険としての現在の原型炉計画では、いくつかの点で前提が異なることに注意すべきです。先ず、エネルギー需要予測の重要な前提となる人口推計が異なっています。我が国の 30 年前と最近の人口推計を比較すると、今から 30 年後の 2046 年の総人口は、30 年前の悲観的な予測さえも上回る速度で減少傾向にあり、1 億人を割り込むという推定も示されています。これらの人口推計から、我が国におけるエネルギー需要が今後 30 年で大幅に増加す

るとは見込めず、需要過多というリスクは30年前の想定よりも減少していると捉えることができます。次に、エネルギー供給の見通しについても30年前と現在では異なっています。原子力による供給実績と目標が福島第一原子力発電所の事故以降に拡大から抑制に転じることや、再生可能エネルギーによる供給実績と目標の大幅な増加は想定されていませんでした。ただし、原子力促進の大きな駆動力であった石油等の化石燃料資源の調達に関わるリスクは、米国におけるシェール革命等によりロジスティクスの多様化が進んでいるものの、いわゆる「アジアプレミアム」価格によって再確認されているとも言えます。

これらのエネルギー需給リスクにおける変化を新たな前提条件として置くと、30年後の未来社会における核融合発電炉の位置付けは、30年前とは異なる想定も考量する必要があるでしょう。すなわち、かつての核融合発電炉で志向されたベースロード電源用の100万キロワット級の大型炉は必ずしも第一義的な目標スペックとはならず、現在天然ガスを燃料とする火力発電所が担っている数10万キロワット級のみドルロード電源を担えるようなスペックが求められることもあり得ます。核融合炉が持つ魅力である、「高レベル放射性廃棄物が発生しない」、「原理的に暴走しない」、「核セキュリティ上の問題が小さい」という特長は、軽水炉を中心とする原子力が担うベースロード電源を順次代替していくというシナリオを検討する際に重要な点となります。また、「燃料資源調達における制約が小さい」、「温室効果ガスの発生が極めて少ない」という特長は、火力発電に対する優位性として考慮できることです。「潜在的放射線リスクが小さい」という特長については、低放射化材料を用いる核融合炉では、運転終了後数10年経過すると、石炭火力発電で発生する石炭灰に含まれる放射性核種（ウラン238系列核種、トリウム232系列核種、カリウム40）よりも低くなるという試算が示されていますが、燃料に用いる放射性同位体である三重水素の社会的受容性の向上とセットで考えるべき点と言えます。

上述したような核融合炉の特長と30年後以降の社会に要求されると考えられる電力システム要素としての機能を考慮して、核融合炉の実用化につながるように、最も基本的な要件である科学的・技術的成立性に立脚したうえで、他の電源と競合可能な経済合理性と社会的合理性の獲得を目指すことが求められます。一方、我が国のみならず多様な世界におけるエネルギーシナリオに対応できるような柔軟性に富んだエネルギー源として核融合炉を提示することができれば、30年後に向けた開発の道筋はより広がることでしょう。特に、今後30年の間に発展する途上国においては大規模電力網の広がりよりも再生可能エネルギーを主体とする小・中規模な電力網が充実する可能性も十分考えられます。このような未来社会において、再生可能エネルギーを多く有する電力グリッドや運輸用燃料のロジスティクス上において核融合炉が共存する新しいエネルギーシステムとして、比較的小型の核融合炉から発生する高温熱を用いてバイオマスから水素燃料を作り出すコンセプトが提案され、概念設計や要素技術に関する基礎研究が進められて

います^[9]。

6. おわりに

以上述べたように、30年後の未来社会において、核融合炉は直接的なエネルギー供給への量的貢献という点では、残念ながら小さい存在であると言わざるを得ません。しかし、世界人類が協力して研究開発を進める核融合炉によるエネルギー供給を示すことは、人類史における偉大なマイルストーンであることは間違いなく、その最初の火は30年後の社会に生きる人々に対して明るい灯となると信じております。ただし、「核融合エネルギーは無限のクリーンエネルギーだから研究開発を進めて当然だ」という我々科学者達の傲慢或いは暢気な主張だけでは、リスクを伴う大きな投資を必要とする核融合研究開発を進めていくことは難しくなることも理解しています。核融合炉が社会に受け入れられ、また社会全体が共有する目標となるような研究開発やアウトリーチの在り方について、円相とともに書かれることの多い「無尽蔵」という禅語の掛物を眺めつつ、自問し、実践する日々が続いています。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、ITERに関する資料をITER機構国内機関から提供を受けました。バイオマスハイブリッド核融合炉コンセプトや未来のエネルギーシステムについては、筆者の所属する研究室の小西哲之教授と武田秀太郎氏のアドバイスを頂きました。

文 献

- (1) 臨済禅黄檗禅公式サイト
http://www.rinnou.net/exhibition/ex_06.html
- (2) 電気授業連合会, 「原子力・エネルギー」図面集 2015, 1-2-13
- (3) Wikipedia ホームページ
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%8E%E3%83%95%E3%82%B9%E3%82%AD%E3%83%BC%E7%B2%92%E5%AD%90>
- (4) 笠田竜太, 「原子炉・核融合炉材料の照射硬化評価のための硬さ試験とナノインデンテーション」, 材料試験技術, 60 巻, 1 号 (2015) 18
- (5) ITER Japan ホームページ
<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/>
- (6) 笠田竜太ら, 若手による核融合炉実用化に向けた技術成熟度評価, プラズマ核融合学会誌, 89 巻, (2013), 193.
- (7) 文部科学省核融合科学技術委員会原型炉開発総合戦略タスクフォースホームページ
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu2/078/index.htm
- (8) 原型炉設計合同特別チームホームページ
<http://www.fusion.qst.go.jp/rokkasyo/project/reactor-sp.html>
- (9) Wedge Infinity 「日本を産油国にする!」
<http://wedge.ismedia.jp/articles/-/938>