

(論文内容の要旨)

本論文は、エネルギー政策から発電システムまで様々なレベルのエネルギーシステムを持続的発展の観点から分析・評価するための統合的方法論の研究開発とその有効性の検証結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は序論であり、まず研究の背景として、持続可能な社会の実現に向けては持続可能なエネルギーシステムの構築が重要課題であり、そのシステムの持続的発展性の評価においては、システムの社会、経済、環境に与える影響の総合的な分析・評価の必要性を指摘している。そして、エネルギー政策から個々の発電システムまで様々なレベルのエネルギーシステムを多角的に分析するためには、持続可能性の観点からエネルギーシステムの特徴を指標化することが有効であることを述べた後、本論文の構成を示している。

第2章では、エネルギーシステムを分析・評価する方法論として **IAEMSD(Integrated Analysis and Evaluation Methodology for Sustainable Development)**を提案している。提案する **IAEMSD** は、まず評価の対象となるエネルギーシステムとその評価目的から、**EISD (Energy Indicator for Sustainable Development)**と呼ばれる定量化可能な指標群を選択する。この **EISD** は特に持続可能性の観点からは、エネルギーシステムの環境適合性、効率、経済性、セキュリティ等の指標群から構成されるものである。本研究では、エネルギーや物質の流れを表現する **MFМ**、地理的情報データベースである **GIS**、指標間の定性的な因果関係を表現する **DSR**、主観的な意思決定を支援する **AHP**、エネルギー品質も含めて統合的にエネルギーシステムを分析する **EXCEM** 等の各種モデルから、**EISD** を導出することで対象とするエネルギーシステムを定量的あるいは定性的に分析・評価する。さらに、**IAEMSD** の有効性を検証するために、①エネルギー政策目標の定性的分析事例として、中国のエネルギーシステムの定性的分析・評価とエネルギー政策の提言、②エネルギー政策の定量的分析事例として、1次エネルギーの価格構造と中国原子力政策の定量的分析・評価、③個別のエネルギーシステムの詳細分析事例として、高温ガス炉を対象とした熱的・経済的観点からの分析・最適化、の3つの事例を実施することを述べている。

第3章では、提案した **IAEMSD** による定性的分析事例として、2000年と2004年の中国における国レベルでのエネルギーシステムを多面的に分析・評価している。ここでは、まず **EISD** として一人あたりの二酸化炭素排出量や **GDP**、1次エネルギー供給量、原子力エネルギー比率、化石燃料エネルギー比率等の社会・経済・環境影響の指標群を選択し、**GIS** と **MFМ** を用いてこれらの **EISD** を導出している。さらに、これに基づいてエネルギーシステムの状況と動向を **DSR** を用いて定性的に分析することで中国の将来のエネルギー政策目標を導出している。その結果、中国では今後、人口増加問題、自動車増加問題、都市化

問題の対策に加えて、天然ガス、原子力、再生可能エネルギー導入の促進と石炭エネルギー利用の低減が重要なエネルギー政策目標であることを示している。

第4章では、エネルギー政策の定量的分析・評価事例として、まずアメリカ、アジア、ヨーロッパの3つの国際市場における天然ガスの価格を EISD として選択し、GIS と共分モデルを用いて価格決定構造の違いを定量的に導出している。具体的には、原油価格の変動に対する各市場の天然ガス価格の変動を弾性係数として定量的に示し、アメリカ、ヨーロッパ、アジアの順で原油価格の変動につられて天然ガス価格も変動することがわかった。そして、この結果をもとに、エネルギー高価格時代には発電コストの大部分を燃料費が占める化石燃料よりも原子力エネルギーが持続可能性の点からも有望であることを示している。さらに、今後大きな発展が予想される中国のエネルギー政策として、新規に導入すべき原子力プラントの型式について、安全性、持続可能性、技術、経済性、信頼性の観点から EISD を選択し、専門家の主観的な意見を定量化する AHP を用いて評価している。その結果、中国では今後 20 年は安全性、信頼性、技術等の観点から新型加圧水型軽水炉 (APWR) が有望であるが、2030 年以降は持続可能性の観点から高速増殖炉 (FBR) も有望であることを示している。

第5章では、提案した IAEMSD による個別のエネルギーシステムの詳細な分析と最適化事例として、電気と水素を製造する高温ガス原子炉コージェネレーションシステムの熱効率と経済性を評価している。具体的には、EISD として高温ガス炉システムの熱効率、発電コスト、水素製造コスト等を選択し、MFM と EXCEM を用いてこれらの EISD を算出している。ここでは特に発電と水素製造の両方にかかわる原子炉部分のコストをエクセルギーをもとに分割計算することで熱効率を考慮した発電コストと水素製造コストを算出している。その結果、電気や水素の需要量によって異なるが、総じて高温ガス炉システムは他の発電・水素製造システムと比較して効率が良く、経済的にも十分競合できることを示している。

第6章は結論であり、上記の3つの事例を通して IAEMSD の有効性を検証するとともに、その限界について述べた後、今後の課題を展望している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、国のエネルギー政策から発電システムまで様々なレベルのエネルギーシステムを持続的発展の観点から分析・評価するための統合的方法論の研究開発とその有効性の検証結果をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. エネルギーシステムが社会、経済、環境に与える影響について総合的に分析・評価する方法論 IAEMSD(Integrated Analysis and Evaluation Methodology for Sustainable Development)を提案した。IAEMSD は、評価するエネルギーシステムと具体的な評価目的から EISD(Energy Indicator for Sustainable Development)と呼ばれる指標群を選択し、多層流れモデル(MFM)、地理情報システム(GIS)、定性推論モデル(DSR)、階層化分析モデル(AHP)、エクセルギー・コスト・エネルギー・質量分析モデル(EXCEM)等のモデル化手法により EISD を導出することで対象とするエネルギーシステムを分析・評価するものである。
2. 提案した IAEMSD によるエネルギー政策の定性的分析事例として、2000 年と 2004 年の中国におけるエネルギーシステムを多面的に評価した。具体的には、まず社会・経済・環境影響の観点から EISD を選択し地理情報システム GIS と多層流れモデル MFM を用いての指標群を導出した。さらに、これに基づいてエネルギーシステムの状況と動向を定性推論モデル DSR を用いて定性的に分析するとともに中国における将来のエネルギー政策目標を導出した。
3. IAEMSD によるエネルギー政策の定量的分析事例として、まず、世界の天然ガスの価格構造を地理情報システム GIS と共和分モデルを用いて定量的に導出した。これをもとにエネルギー高価格時代には化石燃料よりも原子力エネルギーが有望であることを示し、中国に新規導入する原子炉の型式について、安全性、持続可能性、技術、経済性、信頼性の観点から階層化分析モデル AHP を用いて評価した。その結果、中国では今後 20 年は安全性、信頼性、経済性等の観点から新型加圧水型軽水炉(APWR)が有望であるが、2030 年以降は持続可能性の観点から高速増殖炉(FBR)も有望であることを示した。
4. IAEMSD による個別のエネルギーシステムの詳細分析事例として、電気と水素を製造する高温ガス炉コジェネレーションシステムについて、多層流れモデル MFM とエクセルギー・コスト・エネルギー・質量分析モデル EXCEM を用いて熱効率と経済性の観点から分析した。その結果、高温ガス炉システムは他の発電・水素製造システムと比較して効率が良く、経済的にも十分競合できることを示した。
5. 上記の 3 つの具体的事例を通して、提案した IAEMSD の有効性を示すとともに、今後の課題について考察した。

以上、本論文は持続可能なエネルギーシステムの構築のために、システムが社会、経済、環境に与える影響を総合的に分析・評価する方法論を研究開発したもので、得られた成果は持続可能な社会の構築に貢献するものであり、学術上、實際上、資するところが大きい。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 20 年 8 月 11 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。