



JAEA-Research

2006-044



JP0650476

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究
フェーズⅡ 技術検討書
－(3)総合評価－

Feasibility Study on Commercialization of Fast Reactor Cycle Systems
Technical Study Report of Phase II
- (3) Synthetic Evaluation for FR cycle -

次世代原子力システム研究開発部門

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

June 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to

Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡ技術検討書

— (3) 総合評価 —

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門 FBR サイクル統括ユニット
エネルギー評価グループ

(2006年4月20日受理)

本報告書は、FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズⅡ（2001年度から2005年度の5ヶ年を対象）における総合評価として、FBR サイクル候補概念の多面的評価、FBR 移行シナリオ評価および投資対効果評価に関する手法の開発およびその評価結果について、技術検討書としてとりまとめたものである。

多面的評価については、フェーズⅠで検討した安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性の各視点に加え、新たに事業容易性や社会的受容性も評価視点に加えて検討した。これらの評価視点については、評価構造の策定・改良や定量評価に向けた効用関数の整備に取り組み、さらに各視点間の重み付け手法も開発した。以上の検討を通じて合計8つの視点から多面的評価を行い、FBR サイクルシステム候補概念の技術総括による総合的な評価結果の妥当性を確認した。また、FBR と他電源との多面的評価や、いくつかの評価視点に対して時系列評価も試みた。

FBR 導入シナリオ評価については、20の候補概念の中から代表的な概念を取り上げ、軽水炉ワンスルーやブルサーマルシナリオとの比較および多様なニーズに着目したサイクル諸量解析を通じて、FBR 導入の必要性と望ましい炉心の特徴などを明らかにした。

投資対効果評価については、代表的な概念に対して、FBR 移行シナリオに基づき、FBR 実用化によってもたらされる効果額を評価した。FBR を日本に導入した場合と、世界規模で導入した場合の評価を行い、FBR サイクル研究開発への投資が、FBR サイクル実用化によって大きな便益をもたらすという結果が得られた。

以上3つの評価の結果、ナトリウム冷却炉サイクル(MOX 燃料、先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造)が最も有望な概念であることを示した。

大洗研究開発センター(駐在)：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

本報告書には、電力会社9社、電源開発株式会社および日本原子力発電株式会社による電力共通研究の成果の一部、並びに、「日本原子力研究開発機構と財団法人電力中央研究所との原子力の研究開発に関する研究協力協定」に基づく共同研究の成果および電力中央研究所からの開示技術情報を含む。

Feasibility Study on Commercialization of Fast Reactor Cycle Systems

Technical Study Report of Phase II

— (3) Synthetic Evaluation for FR cycle —

Energy Strategy Evaluation Group

FBR Cycle Synthesis Unit

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 20, 2006)

This technical study report presents the outline of the development and the results of Synthetic evaluation on the candidate Fast Reactor (FR) cycle system concepts, from study on the multidimensional evaluation, the scenario study on FR cycle deployment and the cost-benefit analysis on the candidate FR cycle system concepts in the synthetic evaluation (FY2001 through FY2005) of the phase II of the Japanese "Feasibility Study on Commercialization of Fast Reactor Cycle System (FS)".

The characteristic evaluation extended to evaluate a new view point of Business Applicability and Public Acceptance besides the viewpoints of Safety, Economics, Environmental Burden Reduction, Efficient Utilization of Natural Uranium Resources, Nuclear Proliferation Resistance, and Technical Feasibility, which has been considered since the phase I of FS. As for the eight view points, hierarchy structures and utility functions for quantitative evaluation have been developed and/or improved. Furthermore, the methodology for weighing the viewpoints was also developed. The validity of the synthetic technological evaluation results for the candidate FR cycle system concepts was confirmed by the multidimensional evaluation from the eight viewpoints. The characteristic evaluation for alternative power supply systems and the time-series analysis were also evaluated in this report.

FR cycle deployment scenarios clarified the necessity of FR cycle deployment and the desirable core features, etc. through the long-term mass flow analysis, which includes comparison among other nuclear fuel cycle schemes and analysis for evaluating the degree to meet future needs, on the typical FR cycle systems.

The cost-benefit analysis based on the FR cycle deployment scenarios for the typical FR cycle system concepts were carried on two analysis cases, i.e., the FBR cycle R&D for the FS and the world deployment scale. The results showed that the investment for the R&D brings in good returns through the commercialized FR cycle deployment.

The results of the synthetic evaluation based on three evaluations showed that the "Sodium-cooled reactor + oxide fuel + advanced aqueous reprocessing + simplified pelletizing fuel fabrication method" cycle was the most promising concept.

Keywords : Multidimensional Evaluation, Scenario Study, Cost-benefit Analysis, Fast Reactor Cycle System, Feasibility Study on Commercialization of Fast Reactor Cycle System

This report is the outcome of collaborative study between JAEA and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in the accordance with 'the agreement about the development of a commercial fast breeder reactor cycle system'. This report includes the outcome of collaborative study between JAEA and Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) in the accordance with 'the agreement of collaboration about the research and development of atomic energy' and the technical information offered by CRIEPI.

目次

1 本研究の経緯と概要	1
2 本報告書の構成	2
3 研究成果のまとめ	3
付録 A CD-ROM 収録分の目次	5
付録 B 執筆者リスト	9

Contents

1 Background, objectives and scope	1
2 Organization of report	2
3 Concluding remarks	3
Appendix A Contents in the attached CD-ROM	5
Appendix B Authors index	9

This is a blank page.

1 本研究の経緯と概要

1999年7月に開始した高速増殖炉(以下FBRと表記)サイクル実用化戦略調査研究(以下FSと表記)では、2001年3月までのフェーズIにおいて多様な炉型(冷却材としてナトリウム、鉛-ビスマス、ガス、水など)、燃料形態(酸化物、窒化物、金属など)、再処理方法(湿式法、乾式法など)、燃料製造方法(ペレット法、振動充填法、鋳造法など)について幅広い検討を行い、各候補概念の特徴を把握した。

その後、2001年4月から5カ年計画で始まったフェーズIIにおいては、フェーズIの結果を受けて原子炉と燃料サイクルの整合性を考慮して、数多くのFBRサイクル候補概念を対象に総合評価(多面的評価、FBRサイクル導入シナリオ評価、および投資対効果評価などの各特性評価から構成)を行い、2005年度には幾つかの有望なFBRサイクル概念を抽出した。

本報告書は、2003年度に行った中間とりまとめ以降、2004年度から2005年度にかけて行ったフェーズIIの最終評価における、FBRサイクル候補概念の多面的評価、導入シナリオ評価および投資対効果評価に関する手法の開発およびその評価結果について報告するものである。

多面的評価については、フェーズII中間とりまとめまでに開発した安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性、社会的受容性の7つの視点を再整理し、新たに事業容易性を独立させ、これら指標の構造の改良および効用関数の整備等を実施した。8つの視点は安全性から順に技術的実現性までの6つの視点を基本とし、社会的受容性と事業容易性は参考的な視点として位置付けた。以上、8つの視点から多面的評価を行い、20ケースのFBRサイクル候補概念の特性を明らかにした。また、今回初めて経済性、環境負荷低減性の2つの指標について時系列評価を行うとともに、中間とりまとめ時に引き続きFBRと他電源との間で定量的な多面的評価も試みた。

FBR導入シナリオ評価については、候補概念の中から代表的な5つの概念を取り上げ、軽水炉ワンススルーやプルサーマルシナリオとの比較も含めてFBR導入の必要性をサイクル諸量の観点から明らかにした。

投資対効果評価については、日本および世界を対象に評価を実施した。投資額に関しては、上記多面的評価中の技術的実現性のデータを参考にした。また、FBRサイクルの発電コストについては、「FSの設計に基づく評価値」、「2050年でLWRと同等の発電コスト」、および「FBR建設費50%増」の3ケースについて評価を試みている。

2 本報告書の構成

報告書本文の全内容は付録の CD-ROM 内に収録されている。CD-ROM 収録分の、目次(和文・英文)、執筆者リストを、それぞれ付録 A、付録 B に転載した。

CD-ROM 収録分の本文の第 2 章では総合評価の概要を紹介し、第 3 章では多面的評価の手法および結果についてとりまとめた。さらに、第 4 章では FBR サイクル導入シナリオ評価の結果について、第 5 章では投資対効果評価に関する結果をとりまとめた。

3 研究成果のまとめ

高速炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズⅡの後半（平成16年度～17年度）において、原子炉と燃料サイクルの整合性を考慮して組み合わされた20ケースのFBRサイクル候補概念を対象に、多面的評価、FBR導入シナリオ評価、および投資対効果評価を行った。

多面的評価においては、まず、評価指標構造の構築、評価基準の設定、視点間や指標間の重み付けの設定など評価手法の開発に取り組んだ。FBRサイクル候補概念を対象とした多面的評価では、開発目標ならびに具体的な設計要求を設定した「安全性」、「経済性」、「環境負荷低減性」、「資源有効利用性」、および「核拡散抵抗性」の5つの視点に「技術的実現性」を加え基本とし、さらに参考として「社会的受容性」と「事業容易性」の2つの視点を加えて、合計8つの視点から開発目標に対する達成度評価を実施した。「経済性」においては新たに投資リスクの項目を追加した。各視点間の重みは、普通の市民、電気事業者、および有識者を対象に行ったアンケート結果を基に重みを抽出し、設定した。

合否判定の視点である「安全性」と参考として取り上げた「社会的受容性」と「事業容易性」の3つを除いた残り5つの視点から多面的評価を行った結果、炉型別で比較した場合、ほとんどの重み付けのケースにおいて、各視点でバランス良く平均点の高いナトリウム冷却炉サイクル（MOX燃料、金属燃料）が高い評価を受けることが分かった。次いで、鉛ビスマス炉サイクル、ヘリウム冷却炉サイクルと続く。「技術的実現性」に優れる水冷却炉サイクルは、経済性や資源有効利用性で劣る部分をカバーし、普通の市民の重み付けでは鉛ビスマス炉サイクルに匹敵する評価が得られることが分かった。また、参考で実施した「事業容易性」の視点からはナトリウム冷却炉サイクル（MOX燃料）と水冷却炉サイクルが優れており、「社会的受容性」の視点からは恐怖性が低く既知性の高いヘリウム冷却炉サイクルと水冷却炉サイクルが優れていることが分かった。また、全ての重み付けのケースにおいて、燃料サイクルの影響は炉型間の差ほど大きくなかったが、「経済性」については規模の経済効果により小規模システムと大規模システムの間で若干差が生じ、「環境負荷低減性」では、湿式と乾式など燃料サイクルシステムによって廃棄物側への核種移行率に違いがあることからやや差が見られる。

また、「経済性」、「環境負荷低減性」の2つの指標については、FBRサイクル導入シナリオ評価に合わせ時系列評価を実施した。その結果、多面的評価結果と同様、ナトリウム冷却炉サイクル（MOX燃料、金属燃料）が高い評価を受けることが分かった。今後は、各指標構造の改良を進めるとともに、評価基準の見直しなど多面的評価手法の開発に継続的に取り組む。

一方、FBRサイクルの電源としての特徴を把握するために、代表的なFBRサイクル候補概念と軽水炉ワンススルーや火力発電などの他の大規模電源との多面的評価を実施した。評価は、FBRサイクル候補概念間の多面的評価とほぼ同様の手法を用い、「経済性」、「資源供給性」、「放射性物質」、「環境影響低減性」、「社会不安定影響性」、「導入性」、「心理的バイアス低減性」、「事業容易性」の8つの視点から行った。「放射性物質」、「社会不安定影響性」、および「心理的バイアス低減性」を重視した重み付けでは、火力発電の評価点が高くなる傾向が見られる。また、「資源供給性」、「放射性物質」を重視した重み付けで軽水炉（ワンススルーやプルサーマル）の評価点が低めであるものの、FBRサイクルの導入により、「経済性」、「資源供給性」などの観点を改善できることが示された。今後、評価基準および入力データの全体的な信頼性向上を図り、より精度の高い評価を実施する必要がある。

FBR サイクル導入シナリオ評価では、フェーズⅡで新たに開発した FAMILY-21 コードを用いて、多面的評価で取り上げた 20 ケースを代表的な 5 つのグループの FBR サイクル候補概念(主に炉型別概念)に整理して、国内(全体、地域)および世界全体を対象としたサイクル諸量解析を行った。

「環境負荷低減(MA 処分量削減)」、「ウラン資源節約」、「経済性」、「需要変動(原子力発電設備容量 58~約 100GWe)への柔軟性」を追求したシナリオ評価からは、将来の FBR サイクルについて、炉内プルトニウムインベントリが小さくプランケット領域の運用により資源重視型炉心、経済性重視型炉心などに増殖性能に対して柔軟に対応できる能力を有する炉心、また、炉心全体の平均燃焼度が高く再処理量などの各諸量が小さい炉心が望しいことが分かった。発電設備容量 58GWe で FBR 導入を 2050 年と想定した場合、サイクル諸量評価上、総じてナトリウム冷却炉サイクル(MOX 燃料、金属燃料)の性能が良いことが分かった。また、世界規模のニーズを考慮した場合には、国内シナリオを念頭に置いた資源重視型 FBR サイクル概念の増殖性能をさらに強化したオプションが必要となる。

今後は、フェーズⅡで絞り込まれた有望な概念を中心に、最新の FBR サイクルの概念設計を用いて、原子力利用の持続化や多様化に向け高速増殖炉と軽水炉の共存など幅広い将来シナリオを具体的に提示していく予定である。

投資対効果評価では、これまでに開発した投資対効果評価システムを用い、代表的な 5 つのグループの FBR サイクル候補概念を対象に評価を実施した。評価は、発電コスト削減効果など経済性に直接かかわる効果「経済性向上効果」とウラン燃料の輸入削減効果など間接的な効果「外部経済性向上効果」の 2 つの側面について行った。国内を対象とした評価では、いずれの候補概念も投資を上回る経済効果があることが分かった。なかでも発電コストの安いあるいは導入ペースが速いナトリウム冷却炉サイクル(MOX 燃料、金属燃料)は他の炉型と比べて投資を上回る経済効果が大きく、また、鉛ビスマス冷却炉サイクルとヘリウム冷却炉サイクルも十分な経済効果が得られた。一方、世界規模に FBR を導入した投資対効果評価では、国内評価に比べてさらに大きな経済効果があることが分かった。今後、エネルギー経済モデルを取り込んだ FBR の導入影響を評価できる手法を開発し、マクロ経済の観点からより包括的な評価に取り組む予定である。

フェーズⅡでは、多面的評価、シナリオ評価および投資対効果評価の 3 つの中間評価等の結果に基づき、経済性や資源有効利用性等の設計要求の設定において、発電原価(4.0 円/kWh)や増殖性能(増殖比 1.1 程度)等について具体的な提言を行った。平成 18 年度以降の実用化研究においては、フェーズⅡの最終評価結果を基に日本国内だけでなく世界の情勢を鑑み、経済性の一層の向上あるいはより高い増殖性能のオプションの必要性等が求められることが考えられる。このような将来の社会ニーズに適合したより完成度の高い FBR サイクル候補概念の構築を目指して、詳細なシナリオ評価や適切な多面的評価を実施し、設計研究等に適宜フィードバックする予定である。

付録 A CD-ROM 収録分の目次

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII技術検討書

(3) 総合評価 一

目 次

1.はじめに	1
2.総合評価の概要	2
3.FBRサイクルの多面的評価	6
3.1 多面的評価手法	6
3.1.1 多面的評価の概要	6
3.1.2 多重平衡サイクル評価手法	11
3.1.3 時系列評価手法	60
3.1.4 各評価視点の重み付け手法	70
3.2 評価対象としたFBRサイクル概念	124
3.3 各視点からの評価結果	126
3.3.1 安全性の評価結果	126
3.3.2 経済性の評価結果	134
3.3.3 環境負荷低減性の評価結果	143
3.3.4 資源有効利用性の評価結果	147
3.3.5 核拡散抵抗性の評価結果	149
3.3.6 技術的実現性の評価結果	152
3.3.7 事業容易性の評価結果	155
3.3.8 社会的受容性の評価結果	157
3.4 安全性を除く多面的評価結果	202
3.4.1 普通の市民の視点間重み付け結果	202
3.4.2 電気事業者の重み付け結果	206
3.4.3 有識者の重み付け結果	208
3.4.4 重み付けを行わない評価結果(5評価視点からの評価)	209
3.4.5 重み付けを行わない評価結果(7評価視点からの評価)	212
3.4.6 重み付けを行った評価結果(5評価視点からの評価)	214
3.4.7 重み付けを行った評価結果(7評価視点からの評価)	216
3.5 時系列評価	251
3.5.1 時系列経済性評価結果	251
3.5.2 時系列環境負荷低減性評価結果	254
3.5.3 時系列多面的評価のまとめと課題	258
3.6 他電源との比較評価	300
3.6.1 比較評価の前提	300
3.6.2 他電源比較の評価視点	301
3.6.3 他電源比較の評価基準	309

3.6.4 他電源比較における入力値設定	310
3.6.5 他電源比較の評価結果とFBRサイクルの開発と導入による効果	318
3.6.6 他電源比較のまとめと今後の課題	322
3.7 多面的評価のまとめと今後の課題	357
 4. 軽水炉サイクルからFBRサイクルへの移行シナリオ評価	366
4.1 評価対象としたFBRサイクル概念	366
4.2 シナリオ評価の前提条件	369
4.2.1 移行シナリオの基本的考え方	369
4.2.2 国内の想定条件	370
4.2.3 世界の想定条件	372
4.3 各種移行シナリオのサイクル諸量解析結果	385
4.3.1 日本国内を対象とした評価結果	385
4.3.2 世界全体を想定した評価結果	397
4.4 シナリオ評価のまとめと今後の課題	426
4.4.1 シナリオ評価のまとめ	426
4.4.2 今後の課題	427
 5. FBRサイクルの投資対効果評価	429
5.1 投資対効果評価手法	429
5.1.1 投資対効果評価システムの概要	429
5.1.2 研究開発投資額の算出	430
5.1.3 導入効果の金銭価値換算	430
5.2 評価対象としたFBRサイクル概念	436
5.3 投資対効果評価の前提条件	440
5.4 投資対効果評価結果	455
5.4.1 日本国内を対象とした評価結果	455
5.4.2 世界を対象とした評価結果	466
5.5 投資対効果評価のまとめと今後の課題	470
 6. おわりに	474
謝辞	477
 付録1 FBR候補概念および軽水炉・もんじゅの炉特性データ	付 1-(1)
付録2 エネルギー経済モデルを用いた社会経済的影響評価手法の開発	付 2-(1)
付録3 重み付けの結果詳細	付 3-(1)

Appendix A Contents in the attached CD-ROM

Feasibility Study on Commercialization of Fast Reactor Cycle Systems

Technical Study Report of Phase II

— (3) Synthetic Evaluation for FR cycle —

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of synthetic evaluation for FR cycle	2
3. Multidimensional evaluation of FR cycle candidate concepts	6
3.1 Multidimensional evaluation methodology	6
3.1.1 Outline of multidimensional evaluation	6
3.1.2 Multiple equilibrium cycle assessment method	11
3.1.3 Time series assessment method	60
3.1.4 Methodology for weighting the viewpoints	70
3.2 Evaluated FR cycle systems in the candidate concepts	124
3.3 Results of each evaluation viewpoint	126
3.3.1 Results of safety	126
3.3.2 Results of economics	134
3.3.3 Results of environmental burden reduction	143
3.3.4 Results of efficient utilization of natural uranium resources	147
3.3.5 Results of nuclear proliferation resistance	149
3.3.6 Results of technical feasibility	152
3.3.7 Results of business applicability	155
3.3.8 Results of public acceptance	157
3.4 Results of multidimensional evaluation except for safety	202
3.4.1 Results of weighting the viewpoints based on responses from general people	202
3.4.2 Results of weighting the viewpoints based on responses from electricity utility companies	206
3.4.3 Results of weighting the viewpoints based on responses from intellectuals	208
3.4.4 Evaluation results without weighting (from 5 evaluation viewpoints)	209
3.4.5 Evaluation results without weighting (from 7 evaluation viewpoints)	212
3.4.6 Evaluation results with weighting (from 5 evaluation viewpoints)	214
3.4.7 Evaluation results with weighting (from 7 evaluation viewpoints)	216
3.5 Results of time series analysis	251
3.5.1 Results of economics based on time series assessment	251
3.5.2 Results of environmental burden reduction based on time series assessment	254
3.5.3 Conclusions and future works of time series assessment	258
3.6 Comparative evaluation of FR cycle and other power generation systems	300
3.6.1 Assumption of the evaluation	300
3.6.2 Evaluation viewpoints	301
3.6.3 Evaluation standards	309

3.6.4 Input data for the evaluation	310
3.6.5 Results of the evaluation and the benefits from development and deployment of FR cycle	318
3.6.6 Conclusions and future works	322
3.7 Summary and the future works of multidimensional evaluation	357
4. Scenario study of the transition from LWR to FR cycle	366
4.1 Evaluated FR cycle systems in the candidate concepts	366
4.2 Scenario analysis conditions	369
4.2.1 Basic methodology of the transition scenario	369
4.2.2 Assumption conditions of the domestic case	370
4.2.3 Assumption conditions of the world case	372
4.3 Results of scenario analysis of FR cycle systems	385
4.3.1 Results of scenario analysis of the domestic case	385
4.3.2 Results of scenario analysis of the world case	397
4.4 Summary and the future works of scenario study	426
4.4.1 Summary of scenario study	426
4.4.2 Future works	427
5. Cost-benefit analysis on FR cycle R&D	429
5.1 Evaluation method of cost-benefit analysis	429
5.1.1 Cost-benefit analysis system for FR cycle R&D	429
5.1.2 Estimated capital investment for FR cycle R&D	430
5.1.3 Cash-value change of the cost-benefit	430
5.2 Evaluated FR cycle systems in the candidate concepts	436
5.3 Cost-benefit analysis conditions	440
5.4 Results of cost-benefit analysis	455
5.4.1 Results of cost-benefit analysis of the domestic case	455
5.4.2 Results of cost-benefit analysis of the world case	466
5.5 Summary and the future works of cost-benefit analysis	470
6. Afterward	474
Acknowledgment	477

Appendix-1 Burn-up characteristics of FR cycle candidate concepts, LWR and Monju plant付 1-(1)

Appendix-2 Development of socio-economic evaluation utilizing an energy-economic model付 2-(1)

Appendix-3 Detail as a results of weighting the viewpoints付 3-(1)

付録 B 執筆者リスト

1. はじめに	小野 清
2. 総合評価の概要	川崎弘嗣
3. FBR サイクルの多面的評価 3.1 多面的評価手法	塩谷洋樹、加藤篤志、向井田恭子 辺田正則*、安松直人*
3.2 評価対象とした FBR サイクル概念	塩谷洋樹、加藤篤志
3.3 各視点からの評価結果	塩谷洋樹、加藤篤志、向井田恭子、 大滝 明、川崎弘嗣 辺田正則*、安松直人*、久保田貞衣*
3.4 安全性を除く多面的評価結果	塩谷洋樹
3.5 時系列評価	塩谷洋樹、向井田恭子 辺田正則*、安松直人*、久保田貞衣*
3.6 他電源との比較評価	塩谷洋樹、向井田恭子、辺田正則*
3.7 多面的評価のまとめと今後の課題	塩谷洋樹
4. 軽水炉サイクルから FBR サイクルへの 移行シナリオ評価 4.1 評価対象とした FBR サイクル概念	大滝 明
4.2 シナリオ評価の前提条件	大滝 明、久保田貞衣*
4.3 各種移行シナリオのサイクル諸量解析結果	大滝 明、久保田貞衣*
4.4 シナリオ評価のまとめと今後の課題	大滝 明
5. FBR サイクルの投資対効果評価 5.1 投資対効果評価手法	川崎弘嗣
5.2 評価対象とした FBR サイクル概念	川崎弘嗣、安松直人*
5.3 投資対効果評価の前提条件	向井田恭子、川崎弘嗣、安松直人*
5.4 投資対効果評価結果	川崎弘嗣、安松直人*
5.5 投資対効果評価のまとめと今後の課題	川崎弘嗣
6. おわりに	小野 清
付録 1 FBR 候補概念および軽水炉 ・もんじゅの炉特性データ	大滝 明、久保田貞衣*
付録 2 エネルギー経済モデルを用いた 投資対効果評価ツールの開発	塩谷洋樹
付録 3 重み付けの結果詳細	塩谷洋樹

* 株式会社 NESI

Appendix B Authors index

1. Introduction	Kiyoshi Ono
2. Outline of synthetic evaluation for FR cycle	Hirotsugu Kawasaki
3. Multidimensional evaluation of FR cycle candidate concepts 3.1 Multidimensional evaluation methodology	Hiroki Shiotani, Atsushi Kato, Kyoko Mukaida Masanori Heta*, Naoto Yasumatsu*
3.2 Evaluated FR cycle systems in the candidate concepts	Hiroki Shiotani, Atsushi Kato
3.3 Results of each evaluation viewpoint	Hiroki Shiotani, Atsushi Kato, Kyoko Mukaida, Akira Ohtaki, Hirotsugu Kawasaki Masanori Heta*, Naoto Yasumatsu*, Sadae Kubota*
3.4 Results of multidimensional evaluation except for safety	Hiroki Shiotani
3.5 Results of time series analysis	Hiroki Shiotani, Kyoko Mukaida Masanori Heta*, Naoto Yasumatsu*, Sadae Kubota*
3.6 Comparative evaluation of FR cycle and other power generation systems	Hiroki Shiotani, Kyoko Mukaida, Masanori Heta*
3.7 Summary and the future works of multidimensional evaluation	Hiroki Shiotani
4. Scenario study of the transition from LWR to FR cycle 4.1 Evaluated FR cycle systems in the candidate concepts 4.2 Scenario analysis conditions 4.3 Results of scenario analysis of FR cycle systems 4.4 Summary and the future works of scenario study	Akira Ohtaki Akira Ohtaki, Sadae Kubota* Akira Ohtaki, Sadae Kubota* Akira Ohtaki
5. Cost-benefit analysis on FR cycle R&D 5.1 Evaluation method of cost-benefit analysis 5.2 Evaluated FR cycle systems in the candidate concepts 5.3 Cost-benefit analysis conditions 5.4 Results of cost-benefit analysis 5.5 Summary and the future works of cost-benefit analysis	Hirotsugu Kawasaki Hirotsugu Kawasaki, Naoto Yasumatsu* Kyoko Mukaida, Hirotsugu Kawasaki, Naoto Yasumatsu* Hirotsugu Kawasaki, Naoto Yasumatsu* Hirotsugu Kawasaki
6. Afterward	Kiyoshi Ono
Appendix-1 Burn-up characteristics of FR cycle candidate concepts, LWR and Monju plant	Akira Ohtaki, Sadae Kubota*
Appendix-2 Development of socio-economic evaluation utilizing an energy-economic model	Hiroki Shiotani
Appendix-3 Detail as a results of weighting the viewpoints	Hiroki Shiotani

* NESI Inc.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム每立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル每キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア每平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル每立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ每平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	N · m
功率、放射度	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	s · A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シジメンス	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
インダクタンス	ヘンリ	H	Wb/m ²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/A
光度	東ルーメン	lm	K
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	cd · sr ^(c)
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	1m ² · cd=cd 1m ² · m ⁻⁴ · cd=m ⁻² · cd s ⁻¹

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用的する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	kg · s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m^{-1} \cdot s^{-2} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg · s ⁻³
熱容量、エンタロジー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタロジー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アトト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アード	ル	$1a=1 \text{ da}^2=10^{-2} \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1nm=10^{-10} \text{ m}$
バーン	b	$1b=100fm^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニ	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 \text{ P}=1 \text{ dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2=0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ストーカス	St	$1 \text{ St}=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1 \text{ G}=10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 \text{ Oe}=(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx}=10^{-8} \text{ Wb}$
チルブ	sb	$1 \text{ sb}=1 \text{ cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホルト	ph	$1 \text{ ph}=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 \text{ Gal}=1 \text{ cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m/s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位	IX unit	$1X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 \text{ fermi}=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット	Torr	$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
力口リ	cal	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \text{ um}=10^{-6} \text{ m}$