



JAEA-Research

2006-043



JP0650475

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  
-(2)燃料サイクルシステム-

Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems

Technical Study Report of Phase II

- (2) Nuclear Fuel Cycle Systems -

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

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

— (2) 燃料サイクルシステム —

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 燃料サイクルユニット

FBR サイクル統括ユニット

(2006年4月20日 受理)

日本原子力研究開発機構と電気事業者は、電力中央研究所、メーカ各社の協力を得て、1999年7月から安全性の確保を大前提として、軽水炉サイクル及びその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得る高速増殖炉サイクルの実用化像を構築するとともに、将来の主要なエネルギー供給源とするための技術体系を確立することを目的とした「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」を実施している。

フェーズII研究(2001~2005年度)では、フェーズI研究(1999~2000年度)で抽出した再処理技術(先進湿式法、酸化物電解法、金属電解法)及び燃料製造技術(簡素化ペレット法、振動充填法、射出铸造法、被覆粒子法)を組合せた燃料サイクルシステムの各候補概念について、成立性にかかる要素試験研究や解析を実施するとともに、それらの成果を踏まえたシステムの設計検討を行い、炉システムとも整合し各概念が有する能力を最大限に引き出すことが可能な燃料サイクルシステム概念を構築した。また、各燃料サイクルシステムの技術体系整備に向けた技術課題を抽出した上、2015年頃までの研究開発計画をとりまとめた。最終報告としての主要な成果は以下のとおりである。

酸化物燃料について、晶析法、簡素化溶媒抽出法およびマイナーアクチニド(MA)回収技術として抽出クロマトグラフィー法を採用した先進湿式法再処理と、粉末混合工程等を合理化した簡素化ペレット法燃料製造を組み合わせたシステムは、すべての設計要求への適合可能性が高く、スケールアップ効果による経済性向上が期待でき、主たる要素技術について実績があり基本プロセスの技術的成立性も高い。本システムは、晶析や抽出クロマトグラフィーの制御技術開発、低除染TRU燃料の製造技術開発等の課題はあるものの、比較的早期に実用化が可能と期待される。

---

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。

なお、超臨界直接抽出法再処理は、先進湿式法の更なる経済性の向上が図れる可能性があるが、今後更に基盤データの充足が必要である。

先進湿式法再処理とゲル化法スフェアパック燃料製造を組み合わせたシステムは、設計要求への適合可能性があり、燃料製造を溶液および顆粒で取り扱うため微粉の飛散が少ない等の利点があるが、多量の工程廃液を処理するため試薬回収設備や廃液処理設備の建設費が増大する。

一方、酸化物電解法再処理と振動充填法燃料製造を組み合わせたシステムは、設計要求への適合可能性があり、特に再処理で回収した顆粒をそのまま振動充填燃料として使える等工程の簡素化による経済性向上が図れる可能性はあるが、MA回収技術などの技術的成立性を左右する基礎的な課題が多い。

金属燃料については、金属電解法再処理と射出成型法燃料製造を組み合わせたシステムが最適であり、設計要求への適合可能性があり、特に比較的小規模での経済性が期待できるが、大量のプルトニウムを取扱う電解槽内での臨界管理手法や計量管理手法の確立、高レベル廃棄物発生量の低減や使用済燃料を用いたTRU回収技術などの実証が必要である。また、金属燃料サイクルを導入するためには、前処理技術(酸化物の金属燃料への還元技術)も開発していく必要がある。

窒化物燃料については、基本的に再処理法では先進湿式法や金属電解法が、燃料製造法では簡素化ペレット法や振動充填法の一部である「ゲル化法」が適用可能であり、設計要求へ概ね適合する可能性があるが、窒化物燃料特有の<sup>15</sup>N同位体濃縮・回収リサイクル、窒化転換等の枢要技術開発が必要である。また、被覆粒子燃料は、その製造、集合体組立・解体、脱被覆等の技術開発が更に必要となる。

なお、本技術検討書の検討成果は、別途取り纏められている高速増殖炉システム及び統合評価の技術検討書とともに、高速増殖炉サイクルシステムとしての総合評価に資するものである。

## **Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems**

### **Technical Study Report of Phase II**

#### **— (2) Nuclear Fuel Cycle Systems —**

##### **FBR Fuel Cycle Unit and 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)

A joint project team of the Japan Atomic Energy Agency and the Japan Atomic Power Company (as the representative of the electric utilities) started the feasibility study on commercialized fast reactor cycle systems (F/S) in July 1999 in cooperation with the Central Research Institute of Electric Power Industry and manufacturers. On the major premise of safety assurance, F/S aims to present an appropriate picture of commercialization of fast reactor (FR) cycle system which has economic competitiveness with light water reactor cycle systems and other electricity baseload systems, and to establish FR cycle technologies for the future major energy supply.

In the phase-I study of F/S from Japanese fiscal year (JFY) 1999 to 2000, representative FR cycle concepts were screened out. With regard to fuel cycle systems, fuel reprocessing methods such as advanced aqueous, oxide electrowinning and metal electrorefining, and fuel fabrication methods such as simplified pelletizing, sphere-packing, vibro-packing, metal casting and coated particle were selected.

In the phase-II study (JFY 2001-2005), the design study of several fuel cycle systems combined a reprocessing methods with a fuel fabrication ones, and the development of significant technologies necessary for the feasibility evaluation have been performed to clarify the promising candidate concepts suited for maximizing the FR ability. Further, key technical issues for the commercialization of fuel cycle systems are clarified and their R&D plans until around 2015 are made. The summary of results are as follows;

For oxide fuels, the combination system of advanced aqueous reprocessing and simplified pelletizing fuel fabrication will be able to satisfy all design requirements of F/S especially for economy by a relatively large-scale plant. The former system consists of the following three steps : (1) an uranium (U) crystallization to adjust the plutonium (Pu) concentration by separation the certain portion of U, (2) a simplified solvent co-extraction of U, Pu and neptunium (Np), and (3) an extraction chromatography to recover minor actinides (MAs) from the raffinate, while the latter system minimizes the conventional powder mixing steps. And it has also abundant results and a high technical feasibility for the basic process. Though this system faces difficulties in the technical development of control technology of the crystallization and extraction chromatography and the fabrication technology of low decontamination TRU

---

This report includes the outcome of collaborative study between JAEA and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in 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 accordance with "the agreement of collaboration about the research and development of atomic energy" and the technical information offered by CRIEPI.

fuel, etc., its practical use is expected to be possible at an early stage. As for the supercritical direct extraction reprocessing, it is necessary to fulfill more basic data although further economical improvement of an advanced aqueous reprocessing might be expected.

The system which combines the advanced aqueous reprocessing and the gelation sphere packing fuel fabrication for oxide fuels would be able to satisfy the design requirements and it has the advantage of lesser dispersion of the fine powder due to the use of solution and granule in the fuel fabrication process. However, this system will shoulder additional cost for the reagent recovery process and the waste liquid treatment process due to need to dispose of a large bulk of process waste liquid.

The system which combines the oxide electrowinning reprocessing and the vibropacking fuel fabrication process for oxide fuels would be able to satisfy the design requirements and if simplification of the process can be achieved, it has a potential of economical system because oxide deposits on the cathode are granulated and directly used for vibro-packing fuel. However, this system has several primary problems which affect the technical feasibility of the MA recovery process, etc.

The system which combines the metal electrorefining reprocessing and the metal casting fuel fabrication process for metal fuels will be able to satisfy the design requirements especially for economy even in a small-scale plant, although establishment of critical safety control method and material accounting system inevitable for handling a large quantity of Pu in an enlarged electrorefiner, and reduction of high-level radioactive waste processed, verification of the transuranium (TRU) recovery process by spent fuel are required. The development of the head-end process (reduction technology of oxide to metal ) is required for introducing the metal fuel cycle.

As for nitride fuels, specific technical developments of nitrogen-15 enrichment, recycling, and nitride conversion, etc. are required as the main issues, although advanced aqueous or metal electrorefining for reprocessing and simplified pelletizing or gelation in the sphere packing for fuel fabrication can be applied fundamentally and their combination system would be able to satisfy almost the design requirements. Besides technical developments of the fuel fabrication, assembly setting, dismantling, and decladding, etc. are required for coated particle fuels.

The above-mentioned results have contributed to clarify the most promising FR cycle system for the commercialization together with the results of technical study reports on fast reactor plant systems and synthetic evaluation for FR cycle which were separately drawn up.

Keywords : Fast Reactor, Nuclear Fuel Cycle, Reprocessing, Fuel Fabrication, Conceptual Design Study

## 目 次

1. 本研究の経緯と概要 .....	1
2. 本報告書の構成 .....	3
3. 研究成果のまとめ .....	4
謝辞 .....	6
付録 A. CD-ROM 収録分の目次 .....	7
(Appendix A. Contents in the Attached CD-ROM .....	16)
付録 B. 執筆者リスト .....	25
(Appendix B. Major Contributors .....	26)

## Contents

1. BACKGROUND, OBJECTIVES AND SCOPE .....	1
2. ORGANIZATION OF REPORT .....	3
3. CLOSING REMARKS .....	4
ACKNOWLEDGEMENT .....	6
APPENDIX A. CONTENTS IN THE ATTACHED CD-ROM .....	16
APPENDIX B. MAJOR CONTRIBUTORS .....	26

**This is a blank page.**

## 1. 本研究の経緯と概要

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という）と電気事業者は、電力中央研究所（以下「電中研」という）やメーカー各社の協力を得て、1999年7月より、高速増殖炉(FBR)サイクルが本来有する長所を最大限に活用した実用化像を構築し、併せて将来の多様な社会ニーズに柔軟に対応できる開発戦略を提示することにより、FBRサイクルを将来の主要なエネルギー源として確立する技術体系を整備することを目的とした、「FBRサイクルの実用化戦略調査研究」（以下「FS」という）を実施している。

本研究においては、2015年頃に競争力あるFBRサイクルシステムの技術体系を提示できるよう、21世紀のエネルギー資源の需給動向や環境負荷低減に対するニーズ並びに社会展望を分析し、目指すべき安全性、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に係る5つの開発目標を設定している。これらの開発目標を実際の設計検討作業における具体的な指標に展開するため、FBRシステム及び燃料サイクルシステム（再処理システムと燃料製造システムの組み合わせ）のそれぞれのシステムに対して定量的な設計要求を設定し、フェーズを分けてシステム設計検討を段階的に進めている。

フェーズI（1999～2000年度）では、FBRサイクルの候補技術を幅広く調査して、革新技術を導入した概念検討を行い、5つの研究開発目標に対する適合可能性などを評価して、実用化候補概念として有望な複数の概念を抽出した。FBRシステムとしては、冷却材と燃料形態の組合せで考えられる約40の候補から、ナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉、ヘリウムガス冷却炉及び水冷却炉を、燃料サイクルシステムとしては、約10の再処理候補技術から先進湿式法、金属電解法及び酸化物電解法を、約10の燃料製造候補技術からペレット法、振動充填法及び射出鋳造法の各概念を抽出した。

フェーズII（2001～2005年度）では、フェーズIで抽出した各候補概念の検討結果を出発点とし、FBRサイクルとして開発していく実用化候補概念（複数）の明確化、及び今後の研究開発計画の立案に資するために、2003年度末にマイルストーンを置き、その前半と後半に分けて燃料サイクルシステムの検討を進めた。

フェーズIIの前半（2001～2003年度）では、フェーズIで抽出した複数の再処理技術及び燃料製造技術の各候補概念について、経済性等を向上させるために採用した革新技術を中心に、成立性に係る要素技術開発や解析を実施するとともに、FBRシステムとの整合性にも配慮した設計検討を行い、2003年度末に設計要求に対する適合可能性評価の見通しを含めて成果を中間的に取りまとめた。

フェーズIIの後半（2004～2005年度）では、前半に実施した再処理及び燃料製造システムの設計検討及び中間評価結果を踏まえ、最新の要素技術開発成果等ができるだけ反映して、再処理システム及び燃料製造システムの更なる設計の合理化、最適化を行った。それらの各再処理システム及び各燃料製造システム、並びにこれらを組み合わせた燃料サイクルシステムについて、設計要求に対する適合可能性を評価するとともに、要素技術開発や概念設計検討において摘出された、

各燃料サイクルシステムを実用化するための技術体系整備に向けて克服すべき課題の多さ、及びそれぞれの課題の難易度に基づき技術的成立性の評価を行った。また、実用化に向けた国際協力の可能性を含めた技術的実現性の評価として、主要課題について研究開発計画案を検討し、実用化までの開発経費を試算した。これらの検討成果は、別途取り纏められているFBRシステム及び統合評価の技術検討書とともに、FBRサイクルシステムの実用化候補概念の明確化を図るための総合評価に資するものである。

## 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、執筆者リストを、和文はそれぞれ付録A、付録B、英文はそれぞれ付録C、付録Dに転載した。

CD-ROM収録分は、フェーズIIで実施した燃料サイクルシステムの検討成果を取りまとめたものであり、次に述べるような4つの編とその付録から構成されている。

第I編の「燃料サイクルシステムのフェーズII検討の展開」では、燃料サイクルシステム全体に係る共通事項として、FSフェーズIIの開発目標と設計要求、検討対象技術（炉、再処理、燃料製造）、並びにフェーズIIにおける燃料サイクルシステムの検討の進め方について述べる。

第II編の「再処理システムの設計検討」では、燃料サイクルシステムのうち再処理技術について、まず、フェーズII検討の展開と検討対象技術、設計検討の前提条件と基本方針、設計要求への対応、再処理システムの技術評価の視点（燃料サイクルシステムとして一体化した評価が必要な項目を含む）について述べる。これらを踏まえて、先進湿式法、酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の各再処理技術について検討成果を順に述べ、最後に再処理システムとしての技術的総括を行っている。

なお、第II編の付録として、炉とサイクルを含めたFBRサイクル候補概念の多面的評価向けに再処理技術の検討評価を行うために必要な炉心・燃料仕様を付録1に、フッ化物揮発法の机上検討成果を付録2に、経済性評価精度の向上、環境負荷低減性及び保障措置に係る検討成果を付録3から付録5に、国内外の再処理技術開発の動向について付録6に、フェーズII前半で検討した金属電解法の酸化物燃料、窒化物燃料、及び軽水炉（LWR）からの移行期への適用性評価結果を付録7、これまでに検討した再処理技術の評価結果の一覧を付録8に示している。

第III編の「燃料製造システムの設計検討」では、燃料サイクルシステムのうち燃料製造技術について、フェーズII検討の展開と検討対象技術、設計要求への対応方針、技術評価の視点及び評価方法について述べた後、ペレット法、振動充填法（ゲル化・スフェアパック、バイパック）、鋳造法、被覆粒子法の各燃料製造技術について順に検討成果を述べる。最後に、燃料製造システムとしての技術的総括を行っている。

第IV編の「燃料サイクルシステムの技術評価」では、FBRサイクル候補概念の多面的評価用に提供した再処理システムと燃料製造システムのデータについて紹介するとともに、燃料サイクルシステムとしての設計要求への適合性評価と技術総括、実用化に向けた技術的実現性の評価を行っている。

なお、本報告書においては、機微情報として公開できない数値等に対しては、未表示としている。

### 3. 研究成果のまとめ

FBRサイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ（2001～2005年度）の一環として、フェーズⅠ（1999～2000年度）で抽出された再処理技術（先進湿式法、金属電解法、酸化物電解法）及び燃料製造技術（簡素化ペレット法、振動充填法、射出成型法、被覆粒子法）の各技術の特長を活かして両者を組み合わせた燃料サイクルシステムの各候補概念について、炉心平均燃焼度15万MWd/tの酸化物、金属、窒化物燃料FBRを対象に、年間50tHM（金属燃料の場合には発電量で等価な38tHM）および年間200tHM規模で燃料を処理する一体型プラントの概念設計検討を行った。

本設計検討においては、新材料や革新技術を積極的に採用して経済性等の向上を図るとともに、低除染のTRU燃料が燃やせるというFBRの特長を活かしたリサイクルシステムの構築による環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性向上等を図るよう努めた。また、革新技術等については成立性にかかる要素試験研究や解析を実施し、それらの成果をシステム設計検討に反映し、炉システムとも整合し各概念が有する能力を最大限に引き出すことが可能な燃料サイクルシステム概念を構築した。検討結果については、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、運転・保守補修性、技術的成立性に係る各設計要求に対する適合性評価を行った。また、各燃料サイクルシステムの技術体系整備に向けた技術課題を摘出した上、2015年頃までの研究開発計画をとりまとめた。

最終報告としての主要な成果は以下のとおりである。

酸化物燃料について、晶析法、簡素化溶媒抽出法およびマイナーアクチニド(MA)回収技術として抽出クロマトグラフィー法を採用した先進湿式法再処理と、粉末混合工程等を合理化した簡素化ペレット法燃料製造を組み合わせたシステムは、すべての設計要求への適合可能性が高く、スケールアップ効果による経済性向上が期待でき、主たる要素技術について実績があり基本プロセスの技術的成立性も高い。本システムは、晶析や抽出クロマトグラフィーの制御技術開発、低除染TRU燃料の製造技術開発等の課題はあるものの、比較的早期に実用化が可能と期待される。なお、超臨界直接抽出法再処理は、先進湿式法の更なる経済性の向上が図れる可能性があるが、今後更に基礎データの充足が必要である。

先進湿式法再処理とゲル化法スフェアパック燃料製造を組み合わせたシステムは、設計要求への適合可能性があり、燃料製造を溶液および顆粒で取り扱うため微粉の飛散が少ない等の利点があるが、多量の工程廃液を処理するため試薬回収設備や廃液処理設備の建設費が増大する。

一方、酸化物電解法再処理と振動充填法燃料製造を組み合わせたシステムは、設計要求への適合可能性があり、特に再処理で回収した顆粒をそのまま振動充填燃料として使える等工程の簡素化による経済性向上が図れる可能性はあるが、MA回収技術などの技術的成立性を左右する基礎的な課題が多い。

金属燃料については、金属電解法再処理と射出成型法燃料製造を組み合わせたシステムが最適

であり、設計要求への適合可能性があり、特に比較的小規模での経済性が期待できるが、大量のプルトニウムを取扱う電解槽内での臨界管理手法や計量管理手法の確立、高レベル廃棄物発生量の低減や使用済燃料を用いたTRU回収技術などの実証が必要である。また、金属燃料サイクルを導入するためには、前処理技術（酸化物の金属燃料への還元技術）も開発していく必要がある。

窒化物燃料については、基本的に再処理法では先進湿式法や金属電解法が、燃料製造法では簡素化ペレット法や振動充填法の一部である「ゲル化法」が適用可能であり、設計要求へ概ね適合する可能性があるが、窒化物燃料特有の<sup>15</sup>N同位体濃縮・回収リサイクル、窒化転換等の枢要技術開発が必要である。また、被覆粒子燃料は、その製造、集合体組立・解体、脱被覆等の技術開発が更に必要となる。

なお、本技術検討書の検討成果は、別途取り纏められている高速増殖炉システム及び統合評価の技術検討書における検討成果とともに、今後重点的に研究開発を進めていくべき有望な高速増殖炉サイクルシステムを絞り込むための総合評価に資するものである。

## 謝辞

本報告書は、以下に述べるように、原子力機構の関連部署、電気事業者、電中研、メーカ各社・研究機関、大学などの協力、支援を頂いて取り纏めたものである。

原子力機構内においては、旧サイクル機構の東海事業所 環境保全・研究開発センター（現原子力機構の次世代原子力システム研究開発部門 FBR燃料サイクルユニット及び東海研究開発センター 燃料サイクル工学研究所）、プルトニウム燃料センター（現原子力機構のプルトニウム燃料技術開発センター）、建設工務管理部（現原子力機構の東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所 再処理技術開発センター 再処理施設建設推進室）、再処理センター（現原子力機構の再処理技術開発センター）、及び旧サイクル機構の大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室（現原子力機構の大洗研究開発センター 燃料材料試験部 燃料試験課）、並びに旧原研の大洗研究所エネルギーシステム研究部新型燃料研究グループ（現原子力機構の原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット 超ウラン元素燃料挙動研究グループ）の各部署の協力、支援を頂いた。

電気事業者（代表は原電）には、原子力機構との間に研究協力協定を締結し、資金・人的支援、技術情報の提供を含めて多大なご協力を頂いた。

電中研には、原子力機構との間に研究協力協定を締結し、金属燃料を用いた金属電解法再処理及び射出铸造法燃料製造の組合せ概念の技術的検討において、技術情報の提供を含めて多大なご協力を頂いた。

プラント設計・建設や研究開発経験を有するメーカ各社・研究機関（三菱重工㈱、三菱マテリアル株式会社、新型炉技術開発株式会社、㈱東芝、㈱日立、富士電気システムズ㈱、日本エヌ・ユー・エス㈱、東洋エンジニアリング㈱、㈱ペスコ、(財)産創研）には、各種候補概念の設計検討や要素技術開発においてご協力を頂いた。

大学には革新的なアイデアの提案、要素技術開発などにご協力を頂いた。

また、藤岡綱昭、米澤重晃、井上明、定廣大輔、鈴木嘉浩、紫牟田拓志、角田俊哉、小宮山和真、岡本成利の各氏には、フェーズII後半の設計検討作業に加わって、吉氏崇浩、栗田将人の両氏には、本報告書の図表作成においてご尽力頂いた。

さらに、本研究の実施にあたっては、原子力機構内に外部の専門家、有識者を交えた「燃料システム技術検討会」を適宜開催し、研究の進捗状況について報告し、専門的、客観的な立場からコメントなどを頂いた。

これらの本研究の円滑な遂行にご協力頂いた方々に、心から謝意を表したい。

## 付録 A. CD-ROM 収録分の目次

はじめに ..... 1

**第 I 編 燃料サイクルシステムのフェーズ II 検討の展開** ..... 3

1. 実用化戦略調査研究フェーズ II における 開発目標と設計要求、検討対象技術 ..... 7

1.1 フェーズ II の開発目標 ..... 7

1.2 燃料サイクルシステムのフェーズ II の設計要求等 ..... 10

1.2.1 FBR システムとの取り合い条件 (FP、MA 混入率) ..... 10

1.2.2 安全性 ..... 11

1.2.3 経済性 ..... 11

1.2.4 環境負荷低減性 ..... 12

1.2.5 資源有効利用性 ..... 13

1.2.6 核拡散抵抗性 ..... 13

1.2.7 運転・保守補修性 ..... 13

1.2.8 技術的成立性 ..... 13

1.3 FBR サイクルシステムの検討対象技術 ..... 15

2. 燃料サイクルシステムのフェーズ II 検討の進め方 ..... 20

2.1 燃料サイクルシステム構築における基本的考え方 ..... 20

2.2 リファレンスシステムの設定 ..... 22

**第 II 編 再処理システムの設計検討** ..... 23

1. フェーズ II 検討の展開と検討対象技術 ..... 25

1.1 フェーズ I における主要な成果 ..... 25

1.2 フェーズ II における設計検討の展開 ..... 26

[参考文献] ..... 31

2. 設計検討の前提条件と基本方針 ..... 37

2.1 リファレンスシステムの設定 ..... 37

2.2 リファレンスシステム以外の検討システム ..... 38

2.3 設計の前提条件 ..... 38

2.3.1 リファレンスシステムの設計検討における前提条件 ..... 38

2.3.2 窒化物燃料対応の再処理システムの設計条件 ..... 39

2.3.3 再処理システムの多様な燃料サイクルシナリオへの対応 ..... 40

2.4 設計要求への対応 (基本方針) ..... 59

[参考文献] ..... 67

3. 再処理システム (燃料サイクルシステムを含む) の 技術評価の視点 ..... 69

3.1 評価項目 ..... 69

4. 濡式再処理法 ..... 79

4.1 濡式再処理法の概要 ..... 79

4.1.1 従来の湿式再処理法 .....	79
4.1.2 先進湿式法の概要 .....	80
4.1.3 先進湿式法に関する検討の経緯 .....	80
4.1.4 革新技術としての超臨界直接抽出法 .....	81
[参考文献] .....	82
4.2 先進湿式法 (NEXT 法 ; リファレンスシステム) の設計 (酸化物燃料対応) .....	85
4.2.1 施設概念構築 .....	85
4.2.2 技術評価 .....	98
[参考文献] .....	114
4.3 超臨界直接抽出法 .....	152
4.3.1 施設概念構築 .....	152
4.3.2 設計の評価 .....	155
[参考文献] .....	159
4.4 LWR から FBR への移行期における施設のあり方の検討 .....	176
4.4.1 核燃料サイクルのシナリオと施設の仕様 .....	176
4.4.2 処理工程 .....	176
4.4.3 費用の試算 .....	177
[参考文献] .....	178
4.5 多様な燃料サイクルシナリオへの対応 .....	186
4.5.1 増殖比の効果 .....	186
4.5.2 燃料組成変動時の影響 .....	186
4.5.3 水冷却炉検討 .....	187
4.5.4 FP ( $I, T_c, Cs, Sr$ ) 回収及びターゲット ( $I, T_c$ ) ピン処理技術の検討 .....	189
4.5.5 Cm 遅延サイクルシステム技術 .....	191
4.5.6 Cs 及び Sr の減衰処分 .....	192
4.5.7 振動充填燃料の処理 .....	197
4.5.8 多面的評価向け炉心・燃料仕様における再処理システムの評価 .....	198
[参考文献] .....	199
4.6 窒化物燃料への適用 (被覆粒子燃料、ペレット燃料対応) .....	218
4.6.1 検討の要点 .....	218
4.6.2 対応の方針 .....	219
4.6.3 再処理プロセス .....	220
4.6.4 評価 .....	222
4.6.5 開発課題 .....	223
[参考文献] .....	226
4.7 要素技術開発の成果 .....	232
4.7.1 先進湿式法 .....	232
4.7.2 超臨界直接抽出法 .....	234
[参考文献] .....	236
4.8 システムの最適化に関する検討 .....	243

4.8.1 先進湿式法リファレンスシステムの最適化	243
4.8.2 超臨界直接抽出法システムの最適化	247
[参考文献]	249
4.9 技術開発項目	254
4.9.1 技術課題の検討	254
4.9.2 工学規模ホット試験	257
5. 酸化物電解法	259
5.1 酸化物電解法の概要	259
[参考文献]	260
5.2 リファレンスシステムの設計	261
5.2.1 施設概念構築	261
5.2.2 技術評価	279
[参考文献]	296
5.3 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	348
5.3.1 FP (I,Tc,Cs,Sr) 回収技術の検討	348
5.3.2 MA 回収代替技術の検討	349
5.3.3 多面的評価向け炉心・燃料仕様における再処理システムの評価	351
5.3.4 処理規模の効果	353
[参考文献]	357
5.4 これまでの技術開発の成果と今後の課題	366
5.4.1 解体・脱被覆	366
5.4.2 電解装置	366
5.4.3 同時電解工程	367
5.4.4 塩素化溶解工程	367
5.4.5 貴金属FP 分離工程	367
5.4.6 MOX 共析工程	367
5.4.7 電解工程の使用済燃料を用いた試験	368
5.4.8 MA回収工程	368
5.4.9 塩廃棄物処理工程	368
5.4.10 Cl <sub>2</sub> ガス処理工程	369
5.4.11 マテリアルハンドリングおよび保守・補修	369
5.4.12 安全性	369
[参考文献]	370
6. 金属電解法	395
6.1 金属電解法の概要	395
[参考文献]	398
6.2 リファレンスシステムの設計（金属燃料対応）	400
6.2.1 施設概念構築	400
6.2.2 技術評価	421
[参考文献]	438

6.3 多様なサイクルシナリオへの対応	491
6.3.1 FP回収技術の検討	491
6.3.2 多面的評価炉心・燃料仕様における再処理システム評価	492
6.3.3 処理規模の効果	502
[参考文献]	504
6.4 要素技術開発の成果と課題	514
6.4.1 解体・前処理	514
6.4.2 電解精製工程	514
6.4.3 高速電解槽	515
6.4.4 還元抽出	516
6.4.5 陰極処理	516
6.4.6 ゼオライト吸着	517
6.4.7 塩廃棄物固化体	517
6.4.8 運転制御と臨界安全	518
6.4.9 閉じ込め機能	518
6.4.10 火災・爆発防止	518
6.4.11 計量管理	519
6.4.12 全体設備機器の円滑な運転性と主要機器の交換程度	519
6.4.13 許認可対応（運転管理、技術基準、溶接基準等含む）	520
[参考文献]	521
6.5 工学規模ホット試験施設の検討	537
6.5.1 プロセス	537
6.5.2 機器・設備	538
6.5.3 建設費評価	543
7. フッ化物揮発法	547
7.1 フッ化物揮発法の概要	547
7.1.1 各国の開発経緯	547
7.1.2 わが国における開発経緯	548
[参考文献]	549
7.2 フェーズⅡにおけるフッ化物揮発法の検討と今後の開発	551
7.2.1 フェーズⅡにおけるフッ化物揮発法の検討	551
7.2.2 フェーズⅡ以降の開発	552
8. 再処理システムの技術的総括	557
8.1 技術評価結果の概要	557
8.2 濡式法の技術見通し	561
8.2.1 NEXT法（先進濡式法）	561
8.2.2 超臨界直接抽出法	562
8.2.3 NEXT法（先進濡式法）（窒化物燃料対応）	563
8.3 乾式法の技術見通し	567
8.3.1 酸化物電解法（酸化物燃料対応）	567

8.3.2 金属電解法（金属燃料対応）	568
8.3.3 金属電解法（酸化物燃料対応）	568
8.3.4 金属電解法（窒化物燃料対応）	569
8.3.5 フッ化物揮発法（酸化物燃料対応）	569
8.3.6 フッ化物揮発法（窒化物燃料対応）	569
8.4 再処理システムの処理規模と経済性	577
付録 1. 多面的評価向け炉心・燃料仕様	581
付録 2. フッ化物揮発法	603
付録 2.1 はじめに	603
付録 2.2 調査研究の背景	604
付録 2.2.1 フッ化物揮発プロセスの開発経緯	604
付録 2.2.2 これまでのフッ化物揮発プロセス開発結果と課題	607
付録 2.2.3 フッ化物揮発プロセス開発に関する最近の国内の動向	608
付録 2.3 使用済 MOX 燃料関連物質のフッ化特性	619
付録 2.3.1 はじめに	619
付録 2.3.2 ウラン及びプルトニウム化合物の物性	619
付録 2.3.3 ウラン及びプルトニウムのフッ化特性	620
付録 2.3.4 MALT2 による考察	626
付録 2.3.5 使用済 MOX 燃料関連物質のフッ化特性のまとめ	630
付録 2.4 使用済 MOX 燃料関連物質の蒸気圧とフッ化プロセスの限界	642
付録 2.4.1 はじめに	642
付録 2.4.2 TRU 及び FP フッ化物の蒸気圧	642
付録 2.4.3 フッ化プロセスの限界	642
付録 2.4.4 使用済 MOX 燃料関連物質の蒸気圧のまとめ	643
付録 2.5 フッ化物揮発プロセスに関する検討	650
付録 2.5.1 はじめに	650
付録 2.5.2 フッ化プロセスへの適用に関する検討	650
付録 2.5.3 収着プロセス	654
付録 2.5.4 フッ化物揮発プロセスフロー	658
付録 2.5.5 フッ化物揮発プロセスの課題	661
付録 2.5.6 まとめ	662
[参考文献]	664
付録 3. 経済性評価の精度向上	671
付録 3.1 経済性評価手法の検討	671
付録 3.1.1 概要	671
付録 3.1.2 仮定の対象	672
付録 3.1.3 確率分布	673
付録 3.2 評価結果	673
付録 3.3 本手法の適応範囲	673
付録 3.4 既存サイクル施設の建設実績を踏まえた経済性評価精度の向上	677

付録 3.4.1 はじめに.....	677
付録 3.4.2 建電換費（建築及び建築設備）の概算.....	677
付録 3.4.3 サイクル施設における主要変動要因の傾向.....	681
付録 3.4.4 フェーズⅡ検討施設の単価設定.....	682
付録 3.4.5 まとめ.....	683
[参考文献] .....	685
付録 4. 環境負荷低減性に係る検討.....	695
[参考文献] .....	711
付録 5. 先進リサイクルシステムの保障措置概念の検討.....	727
付録 5.1 核拡散抵抗性及び保障措置上の特徴の特定.....	727
付録 5.2 現行の保障措置技術の動向と先進リサイクルシステムへの適用性.....	731
付録 5.3 核拡散抵抗性評価方法及び保障措置方法の検討.....	733
付録 6. 国内外の再処理技術開発の動向 .....	737
付録 7. 金属電解法の金属燃料サイクル以外へ適用検討.....	753
付録 7.1 酸化物燃料への適用.....	753
付録 7.1.1 施設概念構築 .....	753
付録 7.1.2 技術評価.....	766
付録 7.2 窒化物燃料への適用（ペレット燃料対応） .....	795
付録 7.2.1 施設概念構築 .....	795
付録 7.2.2 技術評価.....	803
付録 7.3 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方 .....	827
付録 8. これまでに検討した再処理技術の評価結果 .....	833
 第 III 編 燃料製造システムの設計検討.....	841
1. フェーズⅡの展開 .....	843
1.1 リファレンスシステム .....	843
1.2 多面的評価用システム .....	843
2. 設計要求への対応方針.....	846
2.1 燃料製造の設計条件 .....	846
2.2 施設設計の基本的考え方 .....	847
3. 技術評価の視点及び評価方法 .....	848
3.1 技術評価の視点 .....	848
3.2 評価方法 .....	848
3.2.1 経済性評価方法 .....	849
3.2.2 環境負荷評価方法 .....	850
4. ペレット法 .....	855
4.1 MOX 燃料に対する簡素化ペレット製造システム .....	855
4.1.1 リファレンスシステム設計 .....	857
4.1.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応 .....	890
4.1.3 要素技術開発の成果 .....	903

4.1.4 技術開発項目	905
4.1.5 ホット工学試験施設の検討	907
4.2 壕化物燃料に対するペレット製造システム	984
4.2.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	984
4.2.2 技術開発項目	991
[参考文献]	993
<b>5. 振動充填法</b>	<b>1011</b>
5.1 ゲル化・スフェアパック燃料製造システムの検討	1011
5.1.1 リファレンスシステム設計	1011
5.1.2 多様なサイクルシステムへの対応	1031
5.1.3 ホット工学試験施設の検討	1034
5.1.4 技術開発項目	1034
[参考文献]	1037
5.2 バイパック（酸化物電解顆粒振動充填）燃料製造	1058
5.2.1 リファレンスシステム	1058
5.2.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	1073
5.2.3 技術開発項目	1075
5.2.4 ホット工学試験施設	1076
[参考文献]	1078
<b>6. 鋳造法</b>	<b>1099</b>
6.1 金属燃料製造システムの検討	1099
6.1.1 リファレンスシステム設計	1101
6.1.2 技術評価	1130
6.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	1161
6.2.1 リファレンス炉心設計と高出口温度型炉心設計との比較	1161
6.2.2 資源重視型システムおよび経済性重視型システム	1161
6.3 技術開発項目	1170
6.4 工学規模ホット試験施設の検討	1175
6.4.1 施設概要	1175
[参考文献]	1176
<b>7. 被覆粒子法</b>	<b>1177</b>
7.1 被覆粒子燃料製造システムの検討	1177
7.1.1 リファレンスシステム設計	1178
7.1.2 技術評価	1200
7.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	1228
7.2.1 資源重視型炉心対応システム	1228
7.2.2 経済性重視型炉心対応システム	1229
7.3 技術開発項目	1235
[参考文献]	1235
<b>8. 燃料製造システムの技術的総括</b>	<b>1239</b>

8.1 簡素化ペレット法.....	1239
8.1.1 リファレンスシステム .....	1239
8.1.2 多面的評価用システム .....	1241
8.2 スフェアパック法（湿式再処理対応振動充填法） .....	1243
8.2.1 リファレンスシステム .....	1243
8.2.2 多面的評価用システム .....	1245
8.3 バイパック法（酸化物電解対応振動充填法） .....	1245
8.3.1 リファレンスシステム .....	1245
8.3.2 多面的評価用システム .....	1246
8.4 射出铸造法 .....	1247
8.4.1 リファレンスシステム .....	1247
8.4.2 多面的評価用システム .....	1248
8.5 窒化物燃料 .....	1248
8.5.1 窒化物ペレット燃料 .....	1248
8.5.2 窒化物被覆粒子燃料 .....	1249
8.6 LLFP .....	1249
8.6.1 LLFP 集合体製造システム .....	1249
8.6.2 LLFP 装荷炉心対応用 MOX 燃料集合体製造システム .....	1250
8.7 水冷却炉用 MOX ペレット .....	1250
[参考文献] .....	1251
9. まとめ .....	1261
付録 1. バイパック燃料製造法における分析サンプリング法の検討 .....	1263
付録 1.1 原料顆粒調整工程 .....	1263
付録 1.2 平均 Pu 富化度変動要因 .....	1263
付録 1.3 Pu 富化度変動要因の設定 .....	1263
付録 1.4 顆粒の Pu 含有率モデル .....	1264
付録 1.5 Pu 含有率への誤差伝播 .....	1264
付録 1.6 顆粒グループ毎に平均値が異なる Pu 富化度変動予測計算結果 .....	1264
付録 1.7 まとめ .....	1264
 第 IV 編 燃料サイクル（再処理+燃料製造）システムの技術評価 .....	1271
1. FBR サイクル候補概念の多面的評価 .....	1274
1.1 目的 .....	1274
1.2 多面的評価のためのデータ .....	1274
1.3 算定方法 .....	1275
1.3.1 再処理システム .....	1275
1.3.2 燃料製造システム .....	1277
1.4 評価結果 .....	1279
2. 燃料サイクルシステムの経済性評価 .....	1291
3. 燃料サイクルシステムの技術総括 .....	1294

3.1 先進湿式法再処理と簡素化ペレット法燃料製造の組み合わせシステム (MOX 燃料対応) .....	1294
3.2 先進湿式法再処理とスフェアパック法燃料製造の組み合わせシステム (MOX 燃料対応) .....	1294
3.3 酸化物電解法再処理とバイパック燃料製造の組み合わせシステム (MOX 燃料対応) .....	1295
3.4 金属電解法再処理と射出铸造法燃料製造の組み合わせシステム (金属燃料対応) .....	1296
3.5 先進湿式法再処理と被覆粒子法燃料製造の組み合わせシステム (窒化物燃料対応) .....	1296
<b>4. 実用化に向けた技術的実現性の評価</b> .....	<b>1300</b>
<b>おわりに</b> .....	<b>1311</b>
謝辞 .....	1313
燃料サイクル技術検討書 用語説明 .....	1315

## Appendix A. Contents in the attached CD-ROM

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapter I Perspective of fuel cycle system in the phase II study .....</b>	<b>3</b>
1. Development targets , design requirements and candidate concepts in the feasibility study phase II .....	7
1.1 Development targets of the phase II study .....	7
1.2 Design requirements, etc. of the phase II study .....	10
1.2.1 Condition for coordination between fuel cycle system and FBR system (FP and MA content).....	10
1.2.2 Safety.....	11
1.2.3 Economic competitiveness.....	11
1.2.4 Reduction of environmental burden .....	12
1.2.5 Efficient use of nuclear fuel resources.....	13
1.2.6 Enhancement of nuclear non-proliferation.....	13
1.2.7 Operationability, maintainability and repairability.....	13
1.2.8 Difficulty of technical achievement.....	13
1.3 Candidate concepts of fuel cycle systems.....	15
2. Procedure of fuel cycle system in the phase II study.....	20
2.1 Basic concept of fuel cycle system construction.....	20
2.2 Reference system .....	22
<b>Chapter II Design for fuel reprocessing system .....</b>	<b>23</b>
1. Evolution of the phase II study and candidate concepts .....	25
1.1 Main results in the phase I study .....	25
1.2 Evolution of design study in the phase II study .....	26
[References].....	31
2. Precondition and basic policy of design study .....	37
2.1 Reference systems.....	37
2.2 Other systems.....	38
2.3 Precondition of design.....	38
2.3.1 Precondition for design of reference systems.....	38
2.3.2 Precondition for design of nitride fuel cycle system .....	39
2.3.3 Study of fuel reprocessing systems for various fuel cycle scenarios such as multi-dimensional evaluation.....	40
2.4 Basic policy of correspondence to design requirements .....	59
[References].....	67
3. Viewpoint of technical evaluation of fuel reprocessing systems including fuel cycle systems.....	69
3.1 Evaluation items.....	69

4. Aqueous reprocessing process .....	79
4.1 Introduction.....	79
4.1.1 Current reprocessing process .....	79
4.1.2 Outline of advanced aqueous reprocessing .....	80
4.1.3 Previous investigation on advanced aqueous reprocessing .....	80
4.1.4 Supercritical direct extraction as an innovative method .....	81
[References].....	82
4.2 Design for advanced aqueous reprocessing (NEXT) as a reference for oxide fuel .....	85
4.2.1 Concept of plant.....	85
4.2.2 Technical evaluation.....	98
[References].....	114
4.3 Supercritical direct extraction process.....	152
4.3.1 Concept of plant.....	152
4.3.2 Technical evaluation.....	155
[References].....	159
4.4 Plant concept in transition period from LWR to FBR cycle system .....	176
4.4.1 Scenario on nuclear fuel cycle and plant specification.....	176
4.4.2 Process.....	176
4.4.3 Estimated cost .....	177
[References].....	178
4.5 Study of various fuel cycle scenarios .....	186
4.5.1 Breeding ratio.....	186
4.5.2 Fuel composition .....	186
4.5.3 Water-cooled fast reactor fuel .....	187
4.5.4 Study of FP (I, Tc, Cs, Sr) recovery and target (I, Tc) treatment .....	189
4.5.5 System with Cm storage for decaying .....	191
4.5.6 Disposal of decayed Cs and Sr .....	192
4.5.7 Vibropacking fuel .....	197
4.5.8 Estimation of data for multidementional evaluation .....	198
[References].....	199
4.6 Application for nitride fuel (coated particle and pelletized fuels) .....	218
4.6.1 Essential of investigation .....	218
4.6.2 Plan of application .....	219
4.6.3 Process .....	220
4.6.4 Evaluation .....	222
4.6.5 Subjects of development .....	223
[References].....	226
4.7 Results of elemental R&D .....	232
4.7.1 Advanced aqueous reprocessing .....	232
4.7.2 Supercritical direct extraction .....	234

[References].....	236
4.8 Investigation on system optimization.....	243
4.8.1 Advanced aqueous reprocessing.....	243
4.8.2 Supercritical direct extraction .....	247
[References].....	249
4.9 Subjects of research and development.....	254
4.9.1 Technical subjects.....	254
4.9.2 Engineering hot test.....	257
5. Oxide electrowinning process.....	259
5.1 Introduction.....	259
[References].....	260
5.2 Design for reference system.....	261
5.2.1 Concept of plant.....	261
5.2.2 Technical evaluation.....	279
[References].....	296
5.3 Study of various fuel cycle scenarios .....	348
5.3.1 Study of FP(I,Tc,Cs,Sr) recovery method .....	348
5.3.2 Study of alternative MA recovery method .....	349
5.3.3 Estimation of data for multidementional evaluation.....	351
5.3.4 Evaluation of plant scale effects.....	353
[References].....	357
5.4 R&D results and technical subjects.....	366
5.4.1 Dismantling and decladding step.....	366
5.4.2 Electrolysis equipment.....	366
5.4.3 Anodic dissolution step.....	367
5.4.4 Chlorination step .....	367
5.4.5 Noble metal FP separation step .....	367
5.4.6 MOX co-deposition step .....	367
5.4.7 Spent fuel test.....	368
5.4.8 MA recovery step .....	368
5.4.9 Spent salt vitrification step.....	368
5.4.10 Cl <sub>2</sub> gas treatment.....	369
5.4.11 Material handling and maintenance & repairing .....	369
5.4.12 Safety design .....	369
[References].....	370
6. Metal electrorefining process.....	395
6.1. Introduction.....	395
[References].....	398
6.2. Design for reference system(metallic fuel).....	400
6.2.1 Concept of plant .....	400

6.2.2. Technical evaluation .....	421
[References].....	438
6.3. Study of various fuel cycle scenarios .....	491
6.3.1 Study of FP(I,Tc,Cs,Sr) recovery method .....	491
6.3.2. Estimation of data for multidementional evaluation.....	492
6.3.3. Evaluation of the plant scale effects .....	502
[References].....	504
6.4. R&D results and technical subjects.....	514
6.4.1. Dismantling and decladding step.....	514
6.4.2. Electrorefining step .....	514
6.4.3. High throughput electrorefiner.....	515
6.4.4. Reductive extraction of TRUs.....	516
6.4.5. Cathode deposites processing.....	516
6.4.6. Sorption of FPs into the zeorite .....	517
6.4.7. Waste form of the spent salt .....	518
6.4.8. Operation control and critical safety.....	518
6.4.9. Confinement of the radioactive materials .....	519
6.4.10. Protection against fire and explosion.....	519
6.4.11. Special material accounting .....	519
6.4.12. Overall operationability and frequency of equipment replacement.....	519
6.4.13. Licensing (operation control, technical standards, etc. ) .....	520
[References].....	521
6.5. Development of engineering hot test facility .....	537
6.5.1 Process.....	537
6.5.2 Instrument • equipment .....	538
6.5.3 Building costs evaluation.....	543
7. Fluoride volatility process .....	547
7.1 Introduction.....	547
7.1.1 Developmental background in each country .....	547
7.1.2 Developmental background in Japan .....	548
[References].....	549
7.2 Development of fluoride volatility process in phase II study and future plans .....	551
7.2.1 Development of fluoride volatility process in the phase II study .....	551
7.2.2 Future development plans .....	552
8. Summary of technical evaluation of reprocessing system .....	557
8.1 Introduction.....	557
8.2 Technical outlook of aqueous reprocessing process .....	561
8.2.1 NEXT(advanced aqueous reprocessing process) .....	561
8.2.2 Supercritical direct extraction process .....	562
8.2.3 NEXT (application for nitride fuel ) .....	563

8.3 Technical outlook of pyrochemical reprocessing process.....	567
8.3.1 Oxide electrowinning process (oxide fuel) .....	567
8.3.2 Metal electrorefining process (metallic fuel) .....	568
8.3.3 Metal electrorefining process (oxide fuel) .....	568
8.3.4 Metal electrorefining process (nitride fuel) .....	569
8.3.5 Fluoride volatility process (oxide fuel) .....	569
8.3.6 Fluoride volatility process (nitride fuel) .....	569
8.4 Relation between plant capacity and economic competitiveness.....	577
Appendix 1. Reactor core and fuel specification for multidementional evaluation .....	581
Appendix 2. Fluoride volatility process .....	603
Appendix 2.1 Introduction.....	603
Appendix 2.2 Developmental background .....	604
Appendix 2.2.1 Developmental background in fluoride volatility process .....	604
Appendix 2.2.2 Current developmental result of fluoride volatility process and subject.....	607
Appendix 2.2.3 Recent domestic trend concerning fluoride volatility process development .....	608
Appendix 2.3 Fluoride characteristic of material related to used MOX fuel.....	619
Appendix 2.3.1 Introduction.....	619
Appendix 2.3.2 Physical properties of uranium and plutonium compound.....	619
Appendix 2.3.3 Fluoride characteristic of uranium and plutonium.....	620
Appendix 2.3.4 Consideration by MALT2 .....	626
Appendix 2.3.5 Summary.....	630
Appendix 2.4 Vapor pressure of material related to used MOX fuel and limit of fluoride volatility process .....	642
Appendix 2.4.1 Introduction.....	642
Appendix 2.4.2 Vapor pressure of TRU and FP fluoride.....	642
Appendix 2.4.3 Limit of Fluoride volatility process .....	642
Appendix 2.4.4 Summary.....	643
Appendix 2.5 Development of fluoride volatility process.....	650
Appendix 2.5.1 Introduction.....	650
Appendix 2.5.2 Application to fluoride volatility process .....	650
Appendix 2.5.3 Sorption process .....	654
Appendix 2.5.4 Fluoride volatility process flow.....	658
Appendix 2.5.5 Subject of fluoride volatility process .....	661
Appendix 2.5.6 Summary.....	662
[References].....	664
Appendix 3. Accuracy improvement of economical evaluation .....	671
Appendix 3.1 Development of cost evaluation model for fuel cycle plant.....	671
Appendix 3.1.1 Introduction.....	671
Appendix 3.1.2 Target of assumption.....	672
Appendix 3.1.3 Probability distribution curve.....	673

Appendix 3.2 Results .....	673
Appendix 3.3 Adaptability.....	673
Appendix 3.4 Accuracy improvement of economical evaluation based on construction experience of existing fuel cycle plants .....	677
Appendix 3.4.1 Introduction.....	677
Appendix 3.4.2 Estimation of building cost.....	677
Appendix 3.4.3 Tendency of main variable factor .....	681
Appendix 3.4.4 Establishment of unit cost.....	682
Appendix 3.4.5 Summary.....	683
[References].....	685
Appendix 4. Study of reduction of environmental burden .....	695
[References].....	711
Appendix 5. Study of safeguard for advanced recycling facilities .....	727
Appendix 5.1 Identification of proriferation resistance and safeguard characteristics.....	727
Appendix 5.2 Applicability of current safeguard technology .....	731
Appendix 5.3 Study of evaluation of proriferation resistance and advanced safeguard method.....	733
Appendix 6. Trends of reprocessing technology development .....	737
Appendix 7. Application of metal electrorefining process to other fuel forms .....	753
Appendix 7.1 Application to oxide fuel .....	753
Appendix 7.1.1 Concept of plant .....	753
Appendix 7.1.2 Technical evaluation .....	766
Appendix 7.2 Application to nitride fuel (pellet fuel) .....	795
Appendix 7.2.1 Concept of plant .....	795
Appendix 7.2.2 Technical evaluation .....	803
Appendix 7.3 Study of transition period from LWR to FBR cycle system .....	827
Appendix 8. Technical evaluation results of reprocessing systems reviewed up to date.....	833
<b>Chapter III Design for fuel fabrication system .....</b>	<b>841</b>
1. Evolution in phase II .....	843
1.1 Reference system .....	843
1.2 Systems for multidementional evaluation.....	843
2. Policy of correspondence to design requirements .....	846
2.1 Design conditin for fuel fabrication system .....	846
2.2 Basic concept of system design.....	847
3. Viewpoint and method of technical evaluation .....	848
3.1 Viewpoint of technical evaluation .....	848
3.2 Evaluation method .....	848
3.2.1 Evaluation method of economy .....	849
3.2.2 Evaluation method of environmental burden .....	850
4. Pelletizing method.....	855

4.1 Simplified pelletizing fuel fabrication system for MOX fuel .....	855
4.1.1 Design for reference system.....	857
4.1.2 Study of various fuel cycle scenarios .....	890
4.1.3 Results of elemental R&D .....	903
4.1.4 Subjects of R&D .....	905
4.1.5 Hot engineering test facility.....	907
4.2 Pelletizing fuel fabrication system for nitride fuel .....	984
4.2.1 Study of various fuel cycle scenarios .....	984
4.2.2 Subjects of R&D .....	991
[References].....	993
5. Vibration compaction method .....	1011
5.1 Gelation-sphare-pac fuel fabrication system.....	1011
5.1.1 Design for reference system.....	1011
5.1.2 Study of various fuel cycle scenarios .....	1031
5.1.3 Hot engineering test facility.....	1034
5.1.4 Subjects of R&D .....	1034
[References].....	1037
5.2 VIPAC fuel fabrication system.....	1058
5.2.1 Design for reference system.....	1058
5.2.2 Study of various fuel cycle scenarios .....	1073
5.2.3 Subjects of research and development.....	1075
5.2.4 Hot engineering test facility.....	1076
[References].....	1078
6. Casting method .....	1099
6.1 Metal fuel fabrication system .....	1099
6.1.1 Design for reference system.....	1101
6.1.2 Technical evaluation .....	1130
6.2 Study of various fuel cycle scenarios .....	1161
6.2.1 Comparison between referenced core design and high exit temperature core design.....	1161
6.2.2 Systems corresponding to high breeding core and break-even core .....	1161
6.3 Subjects of R&D .....	1170
6.4 Hot engineering test facility .....	1175
6.4.1 Outline of facility .....	1175
[References].....	1176
7. Coated particle method .....	1177
7.1 Coated particle fuel fabrication system .....	1177
7.1.1 Design for reference system.....	1178
7.1.2 Technical evaluation .....	1200
7.2 Study of various fuel cycle scenarios .....	1228
7.2.1 System corresponding to high breeding core .....	1228

7.2.2 System corresponding to break-even core .....	1229
7.3 Subjects of R&D .....	1235
[References] .....	1235
8. Technical review of fuel fabrication system .....	1239
8.1 Simplified pelletizing fuel fabrication system .....	1239
8.1.1 Reference system .....	1239
8.1.2 Systems for multidementional evaluation .....	1241
8.2 Sphare-pac fuel fabrication system .....	1241
8.2.1 Reference system .....	1241
8.2.2 Systems for multidementional evaluation .....	1243
8.3 VIPAC fuel fabrication system .....	1244
8.3.1 Reference system .....	1244
8.3.2 Systems for multidementional evaluation .....	1245
8.4 Injection casting fuel fabrication system .....	1245
8.4.1 Reference system .....	1245
8.4.2 Systems for multidementional evaluation .....	1247
8.5 Nitride fuel fabrication system .....	1247
8.5.1 Nitride pellet fuel .....	1247
8.5.2 Coated nitride particle fuel .....	1247
8.6 LLFP .....	1248
8.6.1 LLFP target assembly fabrication system .....	1248
8.6.2 LLFP driver MOX fuel assembly fabrication system .....	1248
8.7 MOX pellet fuel for LWR .....	1249
[References] .....	1250
9. Summary .....	1261
Appendix 1. Consideration of sampling method for VIPAC method .....	1263
Appendix 1.1 Granule preparation process .....	1263
Appendix 1.2 Variation factor of averaged Pu content .....	1263
Appendix 1.3 Setting of variation factor of Pu content .....	1263
Appendix 1.4 Model of Pu content of granule .....	1264
Appendix 1.5 Error propagation of Pu content .....	1264
Appendix 1.6 Calcurated prediction of variation of averaged Pu content of mixture of different Pu content groups .....	1264
Appendix 1.7 Summary .....	1264
<b>Chapter IV Technical evaluation of f uel cycle systems .....</b>	<b>1271</b>
1. Multidementional evaluation of candidate concepts of FBR cycle .....	1274
1.1 Purpose .....	1274
1.2 Data for multidementional evaluation .....	1274
1.3 Evaluation method .....	1275

1.3.1 Reprocessing system .....	1275
1.3.2 Fuel fabrication system.....	1277
1.4 Results .....	1279
2. Economical evaluation of fuel cycle systems .....	1291
3. Summary of technical evaluation of fuel cycle systems .....	1294
3.1 Combination of advanced aqueous reprocessing process and simplified pelletizing fuel fabrication process for oxide fuel.....	1294
3.2 Combination of advanced aqueous reprocessing process and sphere-pac fuel fabrication process for oxide fuel .....	1294
3.3 Combination of oxide electrowinning reprocessing process and VIPAC fuel fabrication proces for oxide fuel.....	1295
3.4 Combination of metal electrorefining reprocessing process and injection casting fuel fabrication process for metal fuel.....	1296
3.5 Combination of advanced aqueous reprocessing process and coated nitride particle fuel fabrication process for nitride fuel .....	1296
4. Evaluation of technical feasibility for practical use .....	1300
<b>Closing remarks.....</b>	<b>1311</b>
Acknowledgment.....	1313
Glossary.....	1315

## 付録 B. 執筆者リスト

### 監修

佐藤浩司<sup>(1)</sup>、滑川卓志<sup>(5)</sup>、中村博文<sup>(4)</sup>

### はじめに

佐藤浩司<sup>(1)</sup>、滑川卓志<sup>(5)</sup>

第 I 編 燃料サイクルシステムのフェーズ II 検討の展開

佐藤浩司<sup>(1)</sup>、滑川卓志<sup>(5)</sup>

第 II 編 再処理システムの設計検討

佐藤浩司<sup>(1)</sup>、駒義和<sup>(4)</sup>、高田岳<sup>(4)</sup>、  
矢野公彦<sup>(7)</sup>、小林嗣幸<sup>(4)</sup>、北島庄一<sup>(8)</sup>、  
佐藤史紀<sup>(4)</sup>、天本一平<sup>(6)</sup>、大釜和也<sup>(2)</sup>、  
栗坂健一<sup>(3)</sup>、中林弘樹<sup>(3)</sup>、中西繁之<sup>(3)</sup>、  
樋口達也<sup>(4)</sup>

第 III 編 燃料製造システムの設計検討

滑川卓志<sup>(5)</sup>、石井暁<sup>(5)</sup>、川口浩一<sup>(5)</sup>、

原口信吾<sup>(3)</sup>、小池和宏<sup>(5)</sup>

第 IV 編 燃料サイクルシステムのフェーズ II の技術評価

佐藤浩司<sup>(1)</sup>、滑川卓志<sup>(5)</sup>、駒義和<sup>(4)</sup>、

小林嗣幸<sup>(4)</sup>、中西繁之<sup>(3)</sup>、樋口達也<sup>(4)</sup>

佐藤浩司<sup>(1)</sup>、滑川卓志<sup>(5)</sup>

### おわりに

#### <所属（2006年3月時点）>

- |                      |              |                            |
|----------------------|--------------|----------------------------|
| (1) 日本原子力研究開発機構      | 次世代原子力研究開発部門 | FBR サイクル統括ユニット             |
| (2) 日本原子力研究開発機構      | 次世代原子力研究開発部門 | 研究開発推進室                    |
| (3) 日本原子力研究開発機構      | 次世代原子力研究開発部門 | FBR サイクル統括ユニット FBR サイクル Gr |
| (4) 日本原子力研究開発機構      | 次世代原子力研究開発部門 | FBR 燃料サイクルユニット 再処理システム Gr  |
| (5) 日本原子力研究開発機構      | 次世代原子力研究開発部門 | FBR 燃料サイクルユニット 燃料製造システム Gr |
| (6) 日本原子力研究開発機構      | 次世代原子力研究開発部門 | FBR 燃料サイクルユニット 乾式再処理 Gr    |
| (7) 日本原子力研究開発機構      | 核燃料サイクル工学研究所 | サイクル工学試験部 技術課              |
| (8) 電力中央研究所 原子力技術研究所 | 発電基盤技術領域     |                            |

## Appendix B. Major Contributors

(in no particular order)

Koji Sato <sup>1)</sup>	Tatsuya Higuchi <sup>2)</sup>	Kazuhiro Koike <sup>8)</sup>
Yoshikazu Koma <sup>2)</sup>	Hiroki Nakabayashi <sup>6)</sup>	Shingo Haraguchi <sup>6)*</sup>
Takeshi Takata <sup>2)</sup>	Shigeyuki Nakanishi <sup>6)*</sup>	Satoru Ishii <sup>8)</sup>
Kimihiko Yano <sup>3)</sup>	Kazuya Ohgama <sup>7)</sup>	Kenichi Kurisaka <sup>6)</sup>
Ippei Amamoto <sup>4)</sup>	Tsuguyuki Kobayashi <sup>2)*</sup>	Fuminori Sato <sup>2)</sup>
Shoichi Kitajima <sup>5)*</sup>	Takashi Namekawa <sup>8)</sup>	Koichi Kawaguchi <sup>8)</sup>
Hirofumi Nakamura <sup>2)</sup>		

March 31, 2006

- 1) Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
  - 2) Reprocessing System Design Group, FBR Fuel Cycle Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
  - 3) Technical Administration Section, Nuclear Cycle Engineering Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center
  - 4) Pyrochemical Reprocessing Group, FBR Fuel Cycle Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
  - 5) Former Reprocessing System Engineering Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC (Presently Central Research Institute of Electric Power Industry)
  - 6) FBR Cycle Group, FBR Cycle Synthesis Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
  - 7) Research and Development Co-ordination and Promotion Office, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
  - 8) Fuel Fabrication System Design Group, FBR Fuel Cycle Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
- \* : attached from The Japan Atomic Power Company (JAPC)

# 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	単位
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>	
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>	
速度	メートル毎秒	m/s	
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>	
波数	メートル	m <sup>-1</sup>	
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>	
質量体積(比体積)	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg	
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>	
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>	
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>	
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 <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}$ <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}$ <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
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	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放熱	ワット	W	$J/s$
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^3 \cdot A^2$
コンダクタンス	シemens	S	$V/A$
磁束密度	テスラ	T	$A/V$
インダクタンス	ヘルツ	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^3 \cdot A^2$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	$Wb/m^2$
光度	ラベル	lm	$Wb/A$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	$cd \cdot sr^{(c)}$
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	$lm/m^2$
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	$cd \cdot sr^{(c)}$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量			$lm/m^2$

(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、使用する時は記号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
粘力のモーメント	バースカル	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	$m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$W/m^2$
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
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	エントロピー	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム		
熱伝導率	ワット毎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 <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	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 <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg \cdot s^{-4} \cdot A^2$
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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビン	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	Gy/s	$kg^{-1} \cdot s^{-3}$
吸収線量	グレイ毎秒	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎平方メートル	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル	W/(m <sup>2</sup> · 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
$10^{24}$	ヨクタ	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	p
$10^{12}$	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	a
$10^2$	ヘクタ	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	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーパ	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	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

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	$1a=1 dm^2=10^{-2} m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=1000 hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

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	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチル	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

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	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 Gy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位		$1 X unit=1.002 \times 10^{-3} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr=(101325/760) Pa$
カリヨン	cal	$1 atm=101325 Pa$
ミクロン	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$