特集

高速増殖炉サイクルの実用化戦略 調査研究の取組み状況

Current Status of Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor Cycle System

(核燃料サイクル開発機構) 野田 宏

核燃料サイクル開発機構は電気事業者等と協力して、FBRサイクルの実用化戦略を構築するための調査研究を実施している。そこでは、炉および燃料サイクルについて従来の経緯にとらわれず幅広くサーベイし、安全性、経済性等の向上が見込まれる候補概念の抽出を行っている。例えば、炉システムについては、冷却材をナトリウムだけでなく、ガス(炭酸ガス、ヘリウムガス)、重金属(鉛、鉛-ビスマス)、水、さらに熔融塩まで拡げて実用化の可能性を評価している。燃料形態についても、酸化物燃料に加えて金属燃料、窒化物燃料の採用の可能性を評価している。また、燃料サイクルシステムについては、これまで開発を進めてきた湿式再処理法、ペレット燃料製造法に加えて、乾式再処理法、振動充填燃料製造法等の可能性を評価している。本「特集」では、本会「2000年春の年会」における一連の発表をベースに、これまでの検討状況をレビューし、今後の検討の方向について述べる。

(担当編集委員・植田正弘)

I. はじめに II. 研究計画 III. 開発目標、設計要求および総合評価
IV. FBRシステムの検討 V. 燃料サイクルシステムの検討 VI. おわりに

I. はじめに

核燃料サイクル開発機構(以下、JNCという)は、1999年7月、電気事業者等の関係機関の参画を得て、オールジャパン体制で高速増殖炉サイクル(高速増殖炉、再処理、燃料製造の整合性の取れたシステムを指し、以下、FBRサイクルという)の実用化戦略調査研究を開始した。

以下に、本研究のフェーズI(1999年度および2000年度の2年間)の取組み状況について報告する。

II. 研究計画

1. 研究目的

本研究は、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抽出し、併せて、将来社会の多様な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供給源として確立する技術体系を整備することを目的とする。本研究のフェーズIにおいては、以下に示す研究開発を実施する。

(1) 革新技術を採用した幅広い技術的選択肢の検討および評価を行い、安全確保を前提とし、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性および核拡散抵抗性を評価の視点として、FBRサイクルの実用化候補概念を抽出する。

(2) FBRサイクルの実用化に向けた研究開発計画、並

Hiroshi NODA(Japan Nucl. Cycle Develop. Inst.)
(2000年6月1日 受理)

びに実用化候補概念を絞り込んでいく上で重要な技術課題について検討し、フェーズII(2001年度から5年程度)の研究開発計画を具体化する。

2. 研究体制

JNCは、1999年7月1日、JNC、電気事業者(9電力会社、電源開発㈱および日本原子力発電㈱)、電力中央研究所およびメーカ各社から構成される推進組織をJNC大洗工学センター内に発足させた(第1図)。これに加え、2000年1月には日本原子力研究所の参画も得て、オールジャパン体制で研究開発を進めている。

第1図 実用化戦略調査研究の体制

実用化戦略調査研究を進めるにあたっては、魅力的な実用化システム像を抽出するため、これまでJNC等が進めてきた国際協力を活用するとともに、設計コンペ方式のメーカ提案や国内外の研究機関、大学、メーカ等からのアイデア公募による革新技術も取り込んで、開発目標を達成できるFBRサイクル概念を検討することとした(第2図)。

さらに、多面的な検討により研究の妥当性を確認する観点から、外部の専門家・有識者と社内関係者で構成する技術検討会を設置した。

3. 研究工程

実用化戦略調査研究においては、第3図に示すように、フェーズⅠでは、炉、再処理、燃料製造について、これまで

に国内外で蓄積された研究開発の成果を活用するとともに、革新技術を採用した幅広い技術的選択枝の評価を行い、有望なFBRサイクルの実用化候補概念を抽出しその研究開発計画を策定する。

次に、フェーズⅠの結果に対して、第三者による外部評価を受けた後、フェーズⅡに進み、工学的試験も含めて技術的成立性を確認し、FBRサイクル全体で整合性を図ったシステムに絞り込む。

Ⅲ. 開発目標、設計要求および総合評価

1. FBRサイクルの将来像の提示

エネルギーシステムの将来像を提示するにあたっては、
・21世紀社会における「環境保全型の自立エネルギーシ

第2図 実用化戦略調査研究における協力体制

第3図 実用化戦略調査研究の工程

システムの構築」という社会のニーズに確実に応えるためには、高出力密度の非化石エネルギー源であり、かつ再生可能なエネルギーシステムが必要であること。

- ・ 21世紀中頃に、開発途上国におけるエネルギー需要の増大が引き金となって、石油やウラン資源の需給の逼迫によるエネルギー危機が生じた場合でも、柔軟に対応できるエネルギー技術が必要であること。
- ・ 太陽光発電、風力発電等のリサイクルエネルギーは、発電体系の多様性を確保する観点から、今後も開発を促進する必要があるが、これらはエネルギー密度の希薄な分散型電源であるため、原子力発電を代替できるような基幹エネルギーとはならないこと。

などの21世紀のエネルギー資源を取り巻く諸状況を考慮し、かつ種々の視点に対してバランスのとれた燃料サイクルを目指すために、以下のような魅力を有するFBRサイクルの導入が必要と考えられる。

FBRサイクルの本質的な価値は、「化石燃料資源への依存度を低減し、エネルギー危機に対して強い体質を構築できる」ことにあり、また「ウラン資源を無駄に使わずに可能な限り有効活用する」という点にある。すなわち、軽水炉サイクルはウラン資源の利用効率が約1%であるのに対し、FBRサイクルでは80%以上(燃焼度15万MWd/t、サイクルロス率1%以下と仮定)の利用効率が期待できる。

したがって、ウランの多重リサイクルを前提としたFBRサイクルによる原子力発電を推進することにより、石油や天然ガス等の海外エネルギー資源への依存度を減少させ、我が国のエネルギーシステムの自立化を実現できる。

また、FBRはTRUを効率よく燃焼できる炉心特性を有するため、高次化プルトニウムを含めた余剰プルトニウムの蓄積の問題を解消できる。また、TRU燃焼や長寿命FP核変換により、廃棄物の発生量や毒性のより一層の低減、処分場の合理化を達成できる可能性を有しており、環境負荷低減に貢献することができる。

さらに、FBRでは不純物を含む低除染燃料の使用が可能であることから、燃料サイクル施設のプロセス簡素化、廃棄物低減、コンパクト化などにより、経済性や環境負荷低減性の向上、さらには核拡散抵抗性向上も期待される。

上記の基幹エネルギー源としての利用に加えて、炉心の固有安全性(負のボイド反応度など)、プラントの受動安全性(崩壊熱除去機構や炉停止機構など)、燃料交換の少ない長期運転等を追求した小型炉の活用もFBRサイクルの魅力として考えられる。これらの特長を生かした小型炉により、送電線網の発達していない内陸部の都市や離島での電力供給、あるいは海水淡水化や寒冷地における熱供給など、多様なニーズに応えることができる。

このように、21世紀において、FBRは温室効果ガスや窒素酸化物等を発生させないクリーンなエネルギー源として、原子力利用の拡大に寄与することが期待される。

2. 開発目標および設計要求事項の設定

研究開発の視点としては、すべての前提条件となる「安全性」、並びにFBRサイクルの導入条件として重要な視点である「経済性」が挙げられる。また、前節のFBRサイクルを取り巻く状況および魅力の分析から、FBRサイクルが具備すべき要件として「資源有効利用性」、「環境負荷低減性」および「核拡散抵抗性」が挙げられる。本節ではこれらの5つの視点から開発目標を第4図の通り設定した。

また、FBRサイクルを構成する要素であるFBRプラント、再処理施設および燃料製造施設の各種基本概念を検討する際のベースとなる設計要求事項を、開発目標をもとに設定⁽¹⁾した。主要な事項を第5図に示す。

3. 統合評価

実用化戦略調査研究で進めている魅力あるFBRサイクル像に対する判断材料を提供するために、開発目標として定めた「経済性」、「資源有効利用性」、「核拡散抵抗性」、「環境負荷低減性」および「安全性」の視点に、「技術の実現性」を加えた6つの視点に対する評価指標を設定し、技術レベルの異なるFBRサイクルの特性や達成度をできるだけ客観的かつ多面的に評価する「多面的評価手法」を検討することとしている。

多面的評価手法による相対的な順位付けは、FBRサイクルの実用化候補概念の抽出に際しての判断材料の1つであり、これに加えて、開発目標および設計要求に対する満足度、個別の評価指標に対する達成度、技術の実現性、並びに技術検討会の意見などを総合的に評価・判断して、複数の実用化候補概念を抽出することとしている。

IV. FBR システムの検討

1. 検討対象技術の選定

FBRシステムの検討にあたっては、既往文献の調査、社内提案、メーカ提案、アイデア公募、国内研究協力、国際協力

- 安全性**

 - 炉 ○ 炉心損傷に至る恐れのある事象の発生を防止するとともに、その発生を仮定しても原子炉内で自然に終息
 - 燃料サイクル ○ 臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施す
 - 取扱物質の特性(化学的活性度、毒性等)やプロセス条件(運転温度等)を踏まえた安全対策

経済性

 - 将来の軽水炉に比肩する経済性の達成
 - コスト目標
 - ・ 炉の建設費: 20万円/kWe
 - ・ 再処理費: 27万円/kgHM
 - ・ 燃料製造費: 16万円/kgHM

資源有効利用性

 - 高増殖から低増殖、TRU燃焼まで柔軟に対応
 - 高増殖としては、増殖比1.2程度を目標

環境負荷低減性

 - TRU燃焼及び長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量を低減
 - 施設の運転・保守及び廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物量の低減

核拡散抵抗性

 - FBRサイクルの中で純粋なプルトニウムが単独で存在しないこと
 - 核物質防護性及び保障措置性の対応が良好な設計

第4図 FBRサイクルの開発目標

FBRシステム

- 建設費 : 20万円/kWe
- 運転期間 : 12~24ヶ月程度
- 稼働率 : 90%程度
- 建設工期 : 50ヶ月以内
- 燃焼度 : 15万MWd/t程度
(炉心燃料取出平均)
- 増殖比 : 1.2程度
- TRU燃焼 : MA混入率1~5wt%/HM
- FP混入率 : 2wt%/HM以下
- 安全性 : 受動安全機能、
再臨界回避

燃料サイクル

- 燃料サイクル費 : 43万円/kg-HM
- 処理能力 : 50及び200tHM/年
- 稼働率 : 200日/年
- 燃焼度 : 15万MWd/t程度
(炉心燃料取出平均)
- 回収率 : 99%以上
(将来的に99.9%以上)
- 炉外サイクル時間 : 5年
(冷却4年、再処理・燃料製造1年)
- MA混入率 : 1~5wt%/HM
- FP混入率 : 2wt%/HM以下
- 安全性 : 軽水炉燃料サイクルと同等

第5図 FBRサイクルの主な設計要求事項

等により、国内外のFBRのこれまでの開発経験および新たな概念等を幅広く調査・分析し、冷却材および燃料形態の検討対象技術を選定した。その結果、冷却材としてはナトリウム、重金属(鉛、鉛-ビスマス合金)、ガス(炭酸ガス、ヘリウムガス)、水(沸騰水、加圧水、超臨界圧水)、溶融塩を、燃料形態としては被覆管燃料(酸化物、窒化物、金属)、ヘリウムガス冷却炉用として被覆粒子燃料(酸化物、窒化物)を選定した。なお、出力規模としては、大型炉および中小型炉を選定した。FBRシステムにおける冷却材と燃料形態の検討スコープ⁽²⁾⁽³⁾を第1表に示す。

2. 検討の視点

(1) 安全性確保

FBRの実用化にあたっては、軽水炉と同等ないしはそれ以上の安全性を確保するものとし、IAEA(国際原子力機関)の基本安全原則⁽⁴⁾⁽⁵⁾はもとより、現行の軽水炉に適用される基準および指針類、「もんじゅ」の安全審査で適用された基準および指針類、実証炉の安全基準案等の考え方を参考に、燃料形態および冷却材の特徴を考慮した安全設計とすることとしている。

具体的な安全要求としては、原子炉停止系は十分信頼性の高い設計とするが、これらの安全系に期待しなくとも、炉心損傷に至らずに自然に事象が終息できるよう、受動的な原理で原子炉を停止できる能力を持たせる。併せて、炉心冷却に関しても崩壊熱を自然循環により除去できる設計とする。また、仮想的な炉心損傷状態を仮定しても、大

第1表 フェーズIにおけるFBRシステム検討スコープ

燃料形態 冷却材			燃料形態				液体燃料 (U+Pu)		
			固体燃料			液体燃料			
			被覆管燃料		被覆粒子燃料				
			酸化物	金属	窒化物	酸化物	窒化物		
Na冷却	大型炉		○	○	○				
	中小型モジュール炉		○	○	○				
重金属冷却	大型炉(Pb)		○	○	○				
	中小型モジュール炉 (Pb,Pb-Bi)		○	○	○				
ガス冷却	大型炉	(CO2)	蒸気タービン 発電	○	○	○			
		(He)	蒸気タービン 発電	○	○	○			
			ガスタービン 複合発電 or	○		○	○	○	
	中小型モジュール炉(He)		○		○	○	○		
水(重水) 冷却			○						
燃料による冷却								○	

○ は、検討対象を示す。

な機械的エネルギー放出を伴わず自然に事象終息すること、具体的にはこのエネルギー放出の原因が排除できる炉心設計(即発臨界を超過しないこと、および溶融燃料が集中しないよう炉心外に排出させることにより再臨界を回避する炉心概念)^{(6)~(8)}とする。

また、機器の故障およびヒューマンエラーの影響が極力少なくなるようシステムの簡素化等を通して信頼性の確保を図るとともに、ナトリウムを使用する場合には、その化学反応の影響を緩和する設備対策にも配慮する。

(2) コストダウン方策

FBRシステムの検討では、安全性の向上を図りつつ建設費のコストダウン方策についての検討を中心に進める。ナトリウム冷却炉については、第6図の通り、ループ数の削減、機器合体、新材料の採用等のシステム改善、スケールメリットの追求およびモジュール化による標準化・習熟効果等の追求により、軽水炉と比肩する経済性を達成できるシステム概念を追及する⁽⁹⁾。

3. 炉心燃料の検討

燃料形態として、酸化物燃料、金属燃料および窒化物燃料を対象に、炉心燃料特性を評価するとともに、各種冷却材と炉心燃料の組合せについて評価した。

(1) 酸化物燃料

酸化物燃料は、金属燃料や窒化物燃料と比べて使用実績が豊富であり、技術的に成熟している。ナトリウム冷却炉の再臨界回避方策を考慮した炉心性能評価を行った結果、その方策を工夫することにより開発目標に適合しうる炉心性能(増殖比約1.2、倍增時間約30年)を達成できる見通しが得られつつある(第7図)。しかし、再臨界回避方策の炉心性能へ与える影響が大きいことから、今後、炉心性能へ

の影響を緩和した再臨界回避方策の検討を行うこととしている。また、高燃焼度化(15万 MWd/t)のためには、被覆管材料の開発が重要である。

重金属冷却炉およびガス冷却炉の再臨界回避方策を考慮した炉心性能評価は今後実施する予定であるが、重金属冷却炉は主循環ポンプインペラや構造材等の腐食を抑制するための流速制限により、実効炉心燃料体積比が25~26%程度となり、またガス冷却炉は減圧事故時の冷却性確保等の制約条件により、実効炉心燃料体積比が22%程度となるため、炉心性能はナトリウム冷却炉(実効炉心燃料体積比は、再臨界回避を講じた場合でも33~37%)と比べ同等もしくはやや劣る見通しである。

(2) 金属燃料および窒化物燃料

金属燃料および窒化物燃料は、増殖比(約1.3)および倍增時間(約20年)において酸化物燃料よりも優れた特性を示している⁽¹⁰⁾。また、金属燃料および窒化物燃料はナトリウムとの共存性が良いため、熱伝導性の良いナトリウムを燃料ピンのボンド材として使用することにより燃料温度を低く維持することが可能となる。

金属燃料は被覆管の共晶制限⁽¹¹⁾⁽¹²⁾から炉心出口温度が酸化物燃料より低く制限され、熱効率が若干劣る。高温化にも対応できるように、被覆管と燃料の間にジルコニウムライナを挟んだ構造の燃料の開発等が重要と考えられる。金属燃料は、重金属冷却炉およびガス冷却炉の場合には被覆管表面と冷却材との温度差が約50℃とナトリウム冷却炉の約5倍程度となるため、被覆管の共晶制限を考慮すると、熱効率はナトリウム冷却炉よりも低いと考えられる。

窒化物燃料は、ガス冷却炉以外では炉心溶融事故時に高温燃料と冷却材との激しい熱的相互作用(FCI)および窒素解離による圧力上昇の可能性があることから、これらが問

第6図 建設費20万円/kWeに向けてのコストダウン方策

第7図 MOX炉心性能限界の検討(3,800MWt, 18ヶ月サイクル)

題とならないガス冷却炉に適合すると考えられる。また、窒化物燃料の導入にあたっては、天然窒素の主成分である ^{14}N から生成する ^{14}C による環境負荷増加の抑制と核特性の観点から、 ^{15}N を濃縮して使用した場合の経済性の検討が重要である。被覆粒子燃料は、現状では高速中性子スペクトル条件における被覆層の健全性確保の観点から、燃焼度が制限される可能性があるため、燃焼度向上のために被覆粒子構造の改善を図る等のブレイクスルーが必要と考えられる。

金属および窒化物燃料の高速中性子フルエンスは酸化物燃料より20%程度増加するため、より高い耐スエリング特性の被覆管およびラップ管の開発が求められる。また、金属および窒化物の高燃焼度燃料の照射データおよび安全性試験データが乏しいため、今後、国際協力を活用した効率的な開発計画が必要である。

4. プラントシステムの検討

(1) ナトリウム冷却炉

ナトリウム冷却炉については、沸点が高く、低圧システムが可能であり、自然循環能力が大きい等のナトリウムの利点と、不透明で化学的に活性なナトリウムの欠点を十分認識した上で、安全性の確保を前提に検討を行った。

大型炉については、実証炉の開発経験を活かしたループ型炉と欧州の設計経験を活かしたタンク型炉のシステム概念に対して、第6図に示すように、炉心の低圧損化によるループ数削減、新材料の適用によるシステム機器のコンパクト化等のコストダウン方策を適用した概念について検討した。これらはいずれも建設コスト目標を追求し得ると考えられる。また、更なるコストダウン方策として、不活性中間熱媒体を用いた新型蒸気発生器⁽¹³⁾により、ナトリウ

ム-水反応を排除する概念等(2次系簡素化概念)の検討を進めることとしている。

ループ型炉(第8図)については、ループ数削減(2ループ化)による顕著な物量低減効果や2次系簡素化概念の導入による更なるコストダウンの可能性が期待できることから、今後継続して概念の具体化・詳細化を検討していくこととする。従来のタンク型炉の概念では、ループ数削減により炉内の中間熱交換器径が大きくなり、炉容器径が増大するため、物量削減効果があまり期待できない。このため、タンク型のループ数削減概念については、主としてアイデア公募による飯盒型中間熱交換器を採用したコンパクトな2ループ概念を今後継続して検討していくこととする。

また、中型モジュール炉のS-PRISM(米国GE社)⁽¹⁴⁾は、RVACS(原子炉容器外壁を大気との自然対流により冷却する方式の補助冷却系)を採用可能な範囲でスケールメリットの追求とモジュール効果の両者を活用して建設コスト目標を追求し得る可能性がある。このため、今後、S-PRISMの概念を参考にしてモジュール炉の検討を進めることとする。

(2) 重金属冷却炉

重金属冷却炉では、冷却材として鉛または鉛-ビスマス合金を対象として検討を行った。

鉛は沸点が $1,750^{\circ}\text{C}$ と高く、また、水および空気との反応性が低いことから、ナトリウム冷却炉で設けられている2次ナトリウム系が不要な簡素なシステムにできるとともに、ナトリウム火災対策等を不要とできる利点を有している。

一方、ナトリウムに比べ約10倍の密度を有するため、プラント大型化と耐・免震設計および構造設計との整合性、循

第8図 アドバンスドループ型炉(ループ数削減+機器合体)

第9図 重金属炉の検討(出力/構造成立性の観点からの選定)

環ポンプインペラの腐食防止に係る炉心の流速制限から稠密でコンパクトな炉心にできないこと、運転温度が高温となる鉛冷却材の構造材料等に対する防食技術が必要であり、構造材料の耐久性が課題となることなど、多くの解決すべき技術課題がある。

概念検討の結果、大型炉の場合、タンク式は工場製作性や物量が過大となるなどの問題があり、ループ式は冷却配管構造成立性に問題があることから、いずれも技術的成立性は難しいと考えられる(第9図)。また、中型モジュール炉概念はいずれもタンク型であり⁽¹⁵⁾、大型炉における技術的成立性の課題が避けられる見通しである。鉛-ビスマス炉は、鉛炉と比べて腐食対策が容易であること、融点が低くナトリウム冷却炉の保守技術が適用できること、中型モジュール炉の場合、RVACSの適用が可能であることな

どから鉛炉よりも有利と考えられる。なお、鉛-ビスマスは鉛と比べて²¹⁰Poの生成が多いが、保守時の冷却材温度(鉛冷却炉で約400℃、鉛-ビスマス冷却炉で約200℃)を考慮すれば、カバーガスへの移行量は約10倍程度にとどまるとみられ、冷却材選択に際しての主たる制約要因とならない見込みである。以上のことから、今後は鉛-ビスマス冷却タンク式中型モジュール炉について検討を進めることとする。

(3) ガス冷却炉

ガス冷却炉では、炭酸ガス冷却炉⁽¹⁶⁾およびヘリウムガス冷却炉⁽¹⁷⁾を対象として検討を行った。

ガス冷却炉の利点は、不活性で透明なガスを冷却材として利用することから、2次系のない簡素なシステムとなり、経済性を向上できる可能性があるとともに、プラント

の保守・補修、供用期間中検査が容易にできることである。炭酸ガス冷却炉については、英国の商用炉である改良型ガス冷却炉(AGR)⁽¹⁸⁾の設計・運転経験と、ナトリウム冷却FBRの研究開発で得られた被覆管材料(PE16)⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を活用することから、構造材料との共存性に問題があるものの開発課題は比較的少ない。

一方、ヘリウムガス冷却炉については、ヘリウムガスの熱輸送能力が炭酸ガスより低いことから、システムを高圧化して熱輸送能力を高める必要がある。また、再処理に課題はあるものの高温に耐える被覆粒子燃料を用いて、ガスタービン直接サイクル発電システムにより簡素で高温・高効率を達成する概念が考えられる。

ガスは上記のような利点がある一方で、液体金属よりも熱輸送能力が低いため、被覆管健全性確保のため出力密度を落すことにより、炉心、機器、熱交換器の大型化による物量増加の可能性があること、並びに大型PCRV(プレストレスト・コンクリート原子炉容器)の成立性等の課題がある。また、高圧システム(炭酸ガスで4MPa程度、ヘリウムガスで10MPa程度)となることから、増殖性を確保するため稠密化した炉心燃料の事故時(冷却材喪失時)冷却能力について検討する必要がある。さらに、仮想的な炉心損傷時における再臨界回避と熔融燃料の冷却等の影響緩和方策についても検討する必要がある。

概念検討の結果、被覆管燃料炭酸ガス冷却炉は、AGRの経験とナトリウム冷却炉の成果を活用してスケールメリットを追求することにより経済性目標を追求し得る可能性があること、炉心損傷時の熔融燃料を長期安定冷却するための設備(コアキャッチャ等)の成立性がクリティカルな問題であること等が把握できたことから、今後はこの点を中心に検討することとする。また、被覆管燃料ヘリウムガス冷却炉についても、炭酸ガス冷却炉と同様に経済性目標を追求し得る可能性があり、今後、経済性と炉心安全性を中心に検討することとする。

一方、被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却炉については、被覆粒子燃料の耐高温性を生かし、過酷事象時においても大きな負のドップラ反応度と崩壊熱除去系(DRACS)による除熱に期待して、再臨界回避を必要としない概念が可能であるが、被覆粒子燃料の高速中性子スペクトル条件での高燃焼度化に係る成立性に課題があることから、今後はこの点を中心に検討することとする。

(4) 水冷却炉

水冷却炉は、沸騰水型軽水炉(7.2MPa, 287℃)の炉心を稠密な構成にするか、あるいは、加圧水型炉(15.4MPa, 325℃)に重水を用いることにより増殖炉とする概念⁽²¹⁾⁽²²⁾を検討した。また、超臨界圧水(25MPa, 438~530℃)を用いたシステムでは、直接サイクル(超臨界圧蒸気タービン)を利用でき、簡素なシステム構成の増殖炉概念⁽²³⁾を検討した。水冷却炉もガス冷却炉と同様に高圧システムとなるため、事故時(配管破損時)の炉心冷却性について検討する

必要があり、また、プルトニウム含有率の高い燃料を利用するため、炉心損傷時の再臨界性等の影響緩和方策について検討する必要がある。

今後、炉心損傷に係る検討を行うとともに、低除染燃料の使用に対する炉心性能評価を中心に検討することとする。

(5) 熔融塩炉

熔融塩炉については、塩化物熔融塩タンク型モジュール炉を中心にプラント概念を検討した。熔融塩増殖炉は系統の全燃料インベントリを小さくすることが重要であるが、遅発中性子による原子炉制御の観点から、炉心部では出力密度を下げて燃料滞在時間を確保するため、炉外インベントリを抑える必要がある。このため、中間熱交換器をコンパクトにすることが重要となり、2次冷却材として熔融塩よりも伝熱性能の良い鉛を選定した。現状では、塩化物熔融塩と共存性のある材料開発等がクリティカルな課題である。

今後、経済性のポテンシャル、研究開発課題とその見通しについて検討することとする。

(6) 小型炉

小型炉に関するニーズを考慮して、安全系に受動的な作動原理を採用した簡素で信頼性の高いシステム、分散型電源と競合できる経済性、内部転換比を高めた長期運転サイクル、低除染燃料の利用、不法な燃料取出しが困難な燃料装荷方式(燃料と原子炉の一体化等)の採用などを開発目標として設定した。

これらの目標のもとに、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の3概念について検討中である。ガス冷却炉については、被覆管燃料の場合、炉心損傷時におけるコアキャッチャの設備が追加され複雑化すること、また被覆粒子燃料は高速中性子スペクトル条件での成立性に課題があることから、大型炉での検討結果を待つこととし、今後はナトリウム冷却炉および鉛-ビスマス冷却炉について検討することとする。

5. 今後の計画

炉心燃料については、本研究の検討結果や海外の動向を踏まえ、JNC、電気事業者、電力中央研究所および日本原子力研究所で十分協議して燃料形態を決めていくこととする。また、プラントシステムについては、抽出した有望な概念を対象に、燃料サイクル技術との整合性を取りながら検討を進めることとする。

V. 燃料サイクルシステムの検討

1. 検討対象技術の選定

燃料サイクルシステムの検討も、前述のFBRシステムの検討と同様に幅広く技術を調査・分析し、検討対象技術の選択を行った。その結果を燃料形態とサイクル技術のマトリックスとして整理するとともに、実用化戦略調査研究

における検討のポイントを含めて第2表にまとめる。

燃料形態については、酸化物、窒化物、金属燃料を選定した。

再処理システムについては、処理媒体として水溶液を用いる湿式法と、水溶液を用いない乾式法を選定した。湿式法としては、軽水炉燃料の再処理法として実績のあるPUREX法を合理化・高度化した「先進湿式法」のほか、その一部を代替・補完するプロセスとして「イオン交換法」、「アミン抽出法」、「超臨界流体抽出法」、「沈殿法」等を選定した。乾式法としては、溶融塩中での電解を利用した「酸化物電解法」および「金属電解法」、並びにフッ化物気体の生成し易さの違い等により燃料とFPを分離する「フッ化物揮発法」を選定した。

燃料製造システムについては、「ペレット法」、粒径の異なる燃料粒子を振動している被覆管に直接充填する「振動充填法」、低融点の金属燃料を型に鋳込む「鋳造法」、燃料粒子を直接被覆する「被覆粒子法」を、それぞれ燃料形態と組み合わせて選定した。

なお、3種類の燃料形態のうち、酸化物燃料と窒化物燃料の再処理および燃料製造については、基本的に類似の技術が適用可能であることが調査により判明したため、まず経験の多い酸化物燃料サイクルに対してプロセスフロー、物質収支、設備機器仕様等の概念検討を進め、それらに基づく経済性等の評価を行うとともに、その検討結果をベースに窒化物燃料サイクルについて概略評価を行うこととした。また、これと並行して金属燃料サイクルに関する検討を行うこととした。

2. 検討の視点

FBRの燃料は軽水炉に比べ、不純物の許容量を高くとれるという特長を有している。このため再処理の低除染化が可能となるため、プロセスの簡素化およびこれに基づく

廃棄物発生量の削減、プラントのコンパクト化等の経済性向上や環境負荷低減に寄与し得る改良方策を検討することとした。また、低除染化は核拡散抵抗性の観点からも好ましい方向となる。

安全性確保については、多量のFPを含んだプルトニウム等のTRUを非密封の形で取り扱うため、臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施すとともに、取扱物質の特性（化学的活性度、毒性等）やプロセス条件（運転温度等）を踏まえた安全対策を施すこととした。

技術的成立性や経済性を評価するためのシステム検討においては、再処理および燃料製造施設の処理容量として、比較的小型でかつ経済性を確保できる規模（50 tHM/年）とスケールメリット効果が把握できる比較的大型の規模（200 tHM/年）の2ケースを検討することとした。

3. 再処理システムの検討

（1）湿式再処理法

「先進湿式法」は以下の主要工程から構成される⁽⁹⁾（第10図）。

- ・ プルトニウムをウランおよびネプツニウムと分離せず、低除染で共回収する「簡素化溶媒抽出法」⁽²⁴⁾
- ・ 主工程とは異なる有機溶媒を用い、Am, Cmと炉特性に悪影響を及ぼす希土類元素を含むFPとを粗分離するSETFICS法と、そこで得られるAm, Cm回収製品を洗浄し、硝酸塩等を回収・再利用するためのTRUEX法の組合せによる高レベル廃液からの「TRU回収法」⁽²⁵⁾
- ・ ウラン/プルトニウムの溶解度の差を利用して溶解液中に多量に存在するウランを溶媒抽出の前段で温度を下げて硝酸ウランの結晶として析出させる「晶析法」これによりプルトニウムは単独で回収されず、また晶析法の併用により溶媒抽出プロセスでの処理量が削減される

第2表 燃料形態とサイクル技術の組合せと各技術の検討のポイント

		酸化物	窒化物	金属	検討のポイント
再処理	湿式	○	○		・ 工程の簡素化 ・ TRU回収率の向上 ・ 液体廃棄物発生量の低減 ・ Pu非分離回収
	乾式	○	○	○	・ 工程間の核物質移送技術 ・ TRU回収率の向上 ・ 塩廃棄物処理 ・ 計量管理手法の確立
燃料製造	ペレット	○	○		・ 工程の簡素化 ・ 低除染燃料への適用 ・ 遠隔自動化
	振動充填	○	○		・ 造粒工程の合理化 ・ Pu富化度、充填密度等の品質管理 ・ 廃棄物量低減
	鋳造			○	・ 鋳型廃棄物量の低減 ・ 歩留まりの向上 ・ るつばの寿命延長
	被覆粒子	○	○		・ 炉システム、再処理との整合性

○は適用可能な技術を示す。

第 10 図 先進湿式法のプロセス概念

ことから、廃液発生量の低減が可能となる。上記の方法について、プロセスフローおよび物質収支の評価を行うとともに、遠心抽出器の採用等によりシステムの一層の小型化をねらった機器設備仕様の検討を行った。その結果から、技術的成立性の評価や経済性の評価を行った。なお、経済性評価については、乾式再処理法や燃料製造システムの検討も踏まえて後述する。

酸化燃料に対する先進湿式法およびその代替・補完プロセスの各技術の各設計要求事項に対する適合性について、これまでの検討の結果、各技術とも致命的な欠点は指摘されていない。先進湿式法は軽水炉再処理で実用化されている溶媒抽出技術をベースとしており、技術的成立性の見通しは高いが、晶析プロセスにおける温度制御性や晶析物の回収方法、TRU回収プロセスにおける回収設備の合理化等による経済性向上などの開発課題がある。代替・補完プロセスについては、おのおのの特徴を考慮し、主たる溶媒抽出プロセスとの最適組合せも考慮した検討を進めている。

また、窒化物燃料については、酸化燃料に対する技術が応用できる見通しであるが、燃料ピン中のナトリウムボンド材の除去等の前処理、 ^{14}C および ^{15}N 回収等のための機器・設備が必要となる。

(2) 乾式再処理法

酸化燃料の乾式再処理として、「酸化物電解法」「金属電解法」および「フッ化物揮発法」の検討を行い、オリジナルのプロセスに対し、以下に示すような改良⁽²⁶⁾を加えたプロセスフローを考案し、より詳細な技術成立性の検討を

行った。

- ・酸化物電解法では、ロシア原子炉科学研究所(RIAR)が開発した手法⁽²⁷⁾に対し、同時電解による処理速度の向上・塩素使用量の低減、炉特性に悪影響を及ぼす白金族FPの分離工程の追加、二酸化プルトニウムの単独沈殿からウラン・プルトニウム混合酸化物電解共析への変更、絞電によるMA回収等の改良プロセスを構築した。
- ・金属電解法では、米国アルゴンヌ研究所(ANL)が開発した手法⁽²⁸⁾(ウラン、プルトニウムをMAとともに回収)に対し、熱脱被覆法の採用による脱被覆工程でのFP分離、酸化物の塩素化溶解法の採用による塩廃棄物の削減、白金族FP分離プロセスの追加等の改良プロセスを構築した。
- ・フッ化物揮発法では従来、開発されてきたプロセス⁽²⁹⁾に対し、低除染酸化物としてのウランおよびプルトニウムの共回収、MAの回収等の改良プロセスを構築した。

プロセスの改良例として、酸化物電解法のフローを第11図に示す。

上記の各方式について、それぞれ物質収支の評価を行うとともに機器・配置設計等の概略検討を行った。

乾式再処理システム技術の各設計要求事項に対する適合性について、これまでの検討の結果、各技術とも致命的な欠点は指摘されていない。酸化物電解法および金属電解法は、それぞれロシアおよび米国において実験炉用燃料製造あるいは使用済燃料処理に用いられた技術をベースとして

第 11 図 酸化物電解法プロセスフロー(RIAR開発プロセスとの比較)(酸化物燃料への適用例)

おり、今後、使用済燃料を用いたデータの蓄積が必要であるが、技術的成立性の見通しは高い。フッ化物揮発法は研究開発の段階であるが、ロシア等に有効な知見が存在する見通しもあり、今後の研究の進展が期待できる。

窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しである。また、金属燃料に対する金属電解法については本来、金属燃料を対象に開発された技術であり、技術的成立性の見通しは高い。

4. 燃料製造システムの検討

(1) ペレット法

酸化物ペレット燃料製造法について、経済性向上に向けた工程簡素化を検討した。具体的には、硝酸溶液混合時に燃料仕様に合わせたプルトニウム富化度調整を行い、マイクロ波加熱脱硝時にペレット成型・焼結のための粉末特性調整を行うことで、混合から造粒までの酸化物燃料粉末を取り扱うプロセスを削除し、合理化を図った「簡素化ペレット法」の開発⁽³⁰⁾、およびそれに基づくシステム設計を実施した(第12図)。

先進湿式再処理から得られる低除染の燃料原料粉を使用した酸化物ペレット燃料製造技術を確立するために、上記の簡素化ペレット法をベースに、ホットセルでの遠隔製造プラントの概念検討を行った。

グローブボックスでの簡素化ペレット製造法については、すでに十分な実績がある技術の改良であり、詳細なシステム設計を行うとともに、さらにTRU核種を含有する燃料を取り扱う際の遮蔽設計等について検討を行った。今後、再処理側における溶液状態でのプルトニウム富化度調整、粉末特性調整等の技術の確立が必要である。また、ホットセルでの簡素化ペレット製造法については、製品の

品質保証等セル内でのペレット製造特有の課題、TRUおよびFPを含有した低除染燃料ペレット製造における発熱や放射線への対応等を十分に検討する必要がある。

また、窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しであるが、炭素熱還元/窒化プロセスの追加および窒化物粉末を取り扱うプロセスの不活性雰囲気(アルゴン雰囲気)化等が必要となる。また、¹⁵Nの濃縮技術に関する検討が必要である。

(2) 振動充填法

振動充填法で用いる燃料粒子は再処理の方法に応じてその性状が異なるため、粒子仕様に合致した振動充填条件の最適化を図る必要がある。このような特徴を踏まえて、被覆管に均質に燃料を充填できるシステムの検討を行った(第13図)。

先進湿式法再処理で得られる製品より酸化物燃料粒子を製造し振動充填する方法として、添加剤を加えたウランおよびプルトニウムの硝酸溶液をノズルから液滴状に落下させアンモニアと反応させて球状のゲル球を形成させ、それを洗浄乾燥の後、焙焼、還元焼結して燃料粒子を得る湿式ゲル化法の基本プロセスおよび振動充填条件を中心に検討してきた。また、検討の効率化を図るため、スイスのボールシェラー研究所(PSI)との共同研究を実施している⁽³¹⁾。

第12図 現状プロセスと簡素化プロセスのペレット製造工程の比較

第 13 図 振動充填製造システム(酸化物燃料への適用例)

これらをベースに、先進湿式再処理施設と燃料製造施設を一体化し、サイクル施設間の燃料輸送の削減やユーティリティの共有化等による経済性向上を目指したプラントシステムについて、機器・配置設計等の検討を行った。

一方、乾式法で得られる製品より酸化物燃料粒子を造粒し振動充填する方法については、各乾式再処理方式と整合をとり、以下のような点に留意しつつ、プロセスフロー、物質収支、機器設備仕様の検討を行った。また、乾式再処理と燃料製造の一体化プラントシステムの概念検討を行った。

- ・酸化物電解法では、陰極に析出させた酸化物燃料の結晶を粉砕することにより高密度の燃料顆粒が得られるため、それを直接振動充填燃料として使用することが可能であるが、顆粒形状が不定形であるため、その充填特性を把握する必要がある。
- ・金属電解法で得られる酸化物は、充填性能の向上のために粒子形状を揃える工夫が必要であり、薬品製造の分野で実績のある転動造粒法などが候補技術となる。
- ・フッ化物揮発法では、流動床により直接燃料粒子を得られる特長を活かした振動充填プロセスの合理化を図る必要がある。

これらの技術的成立性については、振動充填燃料はロシアで実績があるが、充填用顆粒製造や充填条件、検査方法

を含む品質保証といった課題解決に取り組む必要がある。また、高燃焼度化への対応として必要な酸素ゲッターの開発や、使用済燃料からリサイクルされた低除染の原料による製造の実証が必要である。

また、窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しであるが、ペレット法と同様の検討が必要である。

(3) 鑄造法

金属燃料については、鑄造法(射出成型法、遠心鑄造法)を検討した。溶融した合金燃料を圧力差でパイプ状の石英ガラス製の鑄型に射出する「射出成型法」⁽³²⁾については、システムが簡素かつコンパクトであるものの、多量の鑄型廃棄物が発生する。一方、その改良方策の一つとして、鑄型の繰り返し使用が可能となる「遠心鑄造法」による金属燃料製造システムの検討を行った。

技術的成立性については、射出成型法は米国で実績のある方法であるが、使用済燃料からリサイクルされた低除染の原料による製造の実証が必要である。遠心鑄造法については、合金組成の均一化、長尺燃料鑄造技術などの課題はあるが、技術的成立性を左右するものではないと考えられる。

以上の燃料サイクルシステムの検討をもとに、再処理-燃料製造一体型プラントとして、物量評価結果から経済性

の概略評価を行った。先進湿式法プラント(処理容量200 tHM/年)については、新技術の採用や工程の簡素化等により、従来のFBR湿式法と比較して大幅にプラント物量が低減され、TRU回収工程を設けた場合でも経済性目標達成の可能性の見通しを得た。一方、乾式プラント(処理容量50 tHM/年)については、酸化燃料を基本として3種類(酸化燃料電解法、金属電解法、フッ化物揮発法)のシステムについて評価した結果、経済性目標を追求し得ると考えられる。今後、さらにコストダウン方策について検討を進めることとしている。

5. 今後の計画

再処理システムおよび燃料製造システムの各候補概念について、現段階では致命的な欠点は認められないことから、これまでの検討を継続し、詳細な検討を進めるとともに、必要な要素技術研究を進めることとする。その際、燃料仕様と炉心性能の関係などFBRシステム側との調整の必要な事項、低除染燃料の仕様(除染係数、不純物濃度等)など燃料サイクル内での調整の必要な事項など、FBRサイクル全体の整合性を考慮して検討を進めていくこととする。

VI. おわりに

本稿においては、1999年7月より開始した実用化戦略調査研究のフェーズIの取組み状況について紹介した。

FBRシステムの検討では、各種冷却材と燃料形態を組み合わせて幅広い検討を行い、各冷却材ごとに有望な炉心概念を評価するとともに、有望なFBRプラントシステム概念を抽出した。2000年度上期は、抽出したこれらの候補概念について詳細な検討を進めていく。

また、燃料サイクルの検討では、各種燃料サイクル技術について、酸化燃料を中心に、概略のプロセス成立性、プラント概念、建設費等の検討を実施した。これまでの検討の結果、各候補概念に対する技術的成立性が見通しと問題解決の方向性が示されていることから、2000年度上期に継続して詳細検討を実施する。

さらに、2000年度下期においては、FBRシステムと燃料サイクルの整合を図ったFBRサイクルとしての総合評価を行い、有望な実用化候補概念を抽出するとともに、フェーズIIの研究開発計画を具体化する計画である。

本研究の成果については、広く国内外の学会等の場で報告を行い、透明性を確保するとともに、専門家、有識者等の評価を受け、今後の円滑な研究活動に資することとしている。

—参考文献—

- (1) 佐藤和二郎, 他: FBRサイクルの実用化戦略調査研究の現状, (2)開発目標と設計要求, 原子力学会「2000春の年会」要旨集, 総合報告3, (2000).
- (2) 可児吉男, 他: FBRサイクルの実用化戦略調査研究の現状, (3) FBRの幅広い技術選択肢に係る設計検討, 原子力学会「2000春の年会」要旨集総合報告3, (2000).
- (3) Sagayama, Y.: Current status of feasibility studies on commercialized fast breeder reactor system, *Proc. 2nd Annu. JNC Int. Forum on the Peaceful Use of Nuclear Energy*, Feb.21-22, 2000, Tokyo, Japan, (2000).
- (4) 能澤正雄, 早田邦久: 原子力発電所のための基本安全原則, 原子力誌, 30 (10), 889~896 (1988).
- (5) IAEA: Basic safety principles for nuclear power plants, Safety Ser., No.75-INSAG-3, (1988).
- (6) Ieda, Y., et al.: Assessment of proposed passive prevention and mitigation measures for future fast reactors, *Int. Topical Mtg. on Advanced Reactor Safety (ARS '94)*, (1994).
- (7) Mashcek, W., et al.: Risk reduction of core-melt accidents in advanced CAPRA burner cores, *Int. Topical Mtg. on Advanced Reactor Safety (ARS '97)*, (1997).
- (8) Niwa, H., Kondo, S., Aizawa, K.: Future needs on the in-pile safety experiments for the commercialization of FBRs, *Prog. Nucl. Energy*, 29, 371~378 (1995).
- (9) Noda, H.: Current status of fast reactor cycle system in Japan, *Proc. ICONE 8*, Apr. 2~6, Baltimore, MD USA, (2000).
- (10) 原子力学会「高度化原子燃料サイクル技術」研究専門委: 新型炉燃料サイクル, 77~80 (1992).
- (11) Cohen, A. B., et al.: Fuel/cladding compatibility in U-19Pu-10Zr/HT9-clad fuel at elevated temperatures, *J. Nucl. Mater.*, 204, 244~251 (1993).
- (12) Ogata, T., et al.: Reactions between U-Pu-Zr alloys and Fe at 923K, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 37 (3), 244~252 (2000).
- (13) エネルギー総合工学研究所: 平成10年度高速増殖炉利用システム開発調査報告書(FBR新技術フィージビリティ調査), IAE-C9821, (1999).
- (14) Boardman, C. E., et al.: Optimizing the size of the Super-PRISM reactor, *Proc. ICONE 8*, Apr. 2~6, Baltimore, MD USA, (2000).
- (15) Zrodnikov, A. V., et al.: Multipurposed reactor module SVBR-75/100, *Proc. ICONE 8*, Apr. 2~6, Baltimore, MD USA, (2000).
- (16) Lennox, T. A., et al.: Gas cooled fast reactors, *ENC '98*, (1998).
- (17) Kemmish, W. B.: Gas-cooled fast reactors, *Nucl. Energy*, 21, 77~88 (1982).
- (18) IAEA: Status of and Prospects for Gas-cooled Reactors, Technical Rep. Ser. No.235, (1984).
- (19) Jones, R. B.: Fuel cladding for gas cooled fast reactors—A view of the sealed pin design in 1984, *Nuclear Fuel Performance*, BNES, (1985).
- (20) Naganuma, M., et al.: High burn-up irradiation performance of annular fuel pins irradiated in fast reactor PFR, *IAEA-SM-358-24*, (1999).
- (21) 岩村公道, 他: 低減速スペクトル炉の研究, *JAERI-Research* 99-058, (1999).
- (22) 中島伸也, 落合政昭(編): 水冷却炉におけるプルトニウム利用の高度化に関する研究会報告書, *JAERI-Conf.* 99-014, (1999).
- (23) 渡嘉敷幹夫, 他: 超臨界軽水冷却高速炉の増殖性, 新型炉研究会第8回報告書, *UTNL-R-0372*, (1998).

- ②④ 紙谷正仁, 他: 先進的湿式再処理/MOX 燃料製造の概念, 動燃技報, No.100, 207~214 (1996).
- ②⑤ 駒 義和, 他: 溶媒抽出による 3 価アクチニドとランタニドの分離, 動燃技報, No.101, 87~93 (1997).
- ②⑥ Ojima, H., *et al.*: Current status of feasibility studies on commercialized fuel cycle system for fast breeder reactor system, *Proc. 2nd Annu. JNC Int. Forum on the Peaceful Use of Nuclear Energy*, Feb.21~22, Tokyo, Japan, 78 (2000).
- ②⑦ Bychkov, A. V., *et al.*: *Proc. Int. Conf. Future Nuclear Systems—Challenge Towards Second Nuclear Era with Advanced Fuel Cycles (Global '97)*, Oct.5~10, 1997, Yokohama, Japan, Vol.2, 912 (1997).
- ②⑧ Miller, W. E., *et al.*: Choice of pyroprocess for integral fast reactor fuel, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 50, 205 (1985).
- ②⑨ Leviz, N. M., *et al.*: A conceptual design study of a fluo-
e-volatility plant for reprocessing LMFBR fuels, *ANL-7583*, (1969).
- ③⑩ Asakura, K., *et al.*: Current developments of fuel fabrication technologies at the plutonium fuel production facility, PFPF, *IAEA-SM-358/4*, Int. Symp. on MOX Fuel Cycle Technologies for Medium and Long Term Development, Vienna, (1999).
- ③⑪ Nomura, S., *et al.*: Simplifying the process flow sheet for actinide fuel fabrication, preparation for an irradiation test in JOYO, GLOBAL '99, Aug. 29~Sep.3, 1999, Jackson Hole, Wyoming, USA.
- ③⑫ Feldman, M. J., *et al.*: Remote refabrication of EBR-II fuels, *Nucl. Mater.*, 15, 77 (1969).

ミクロ科学とエネルギー

日本原子力学会編 コロナ社刊

1999年12月13日発行 好評発売中

B5判, 194頁, 会員特価2,000円(定価2,500円), 税・送費別

ご希望の方は学会事務局(TEL03-3508-1261, FAX03-3581-6128)まで。

会員外, 書店等のご注文は直接コロナ社(TEL03-3941-3131)へ。

本書は高校生, および入学して日の浅い大学生を対象とした副読本である。特に理科の素養は前提とせず, どのページから読み始めても理解できる記述を心がけ, 文部省の学習指導要領にはとらわれない解説の順序とした。第1章「いろいろなエネルギー」, 第2章「暮らしの中のエネルギー」, 第3章「ミクロの世界を探索する」, 第4章「暮らしの中の放射線」。過去数百年に科学技術発展の基礎となった原理を語ることが目的で厳密性よりも平易な記述を重視した。

身近な力学現象から説き起こしてエネルギーの概念を無理なく導入し, 生活に内在したさまざまなエネルギーの形態とその重要性を指摘する。核分裂や原子力発電もその一部として登場する(第1章, 第2章)。次に歴史的発展に沿ってミクロ科学の内容が紹介される(第3章)。解説は最新の話題, ニュートリノの質量にまで至る。第4章ではミクロ世界から発信された情報, すなわち放射線に関して, その性質, 利用技術, 安全上の配慮や心得が述べられる。

当学会から出版された「原子力がひらく世紀」の姉妹編である。前者は原子力発電および放射線の利用を前面に掲げたが, 本書はそれよりさらに基本的な, 自然界に対する理解をまず身に付けてもらうことを目指した。JCO事故のために一般社会が抱いた原子力, 放射線に対する不安を, 本書, 特に第4章が和らげる役を果たして欲しいと願う。

(「ミクロ科学とエネルギー」編集委員長・仁科浩二郎)