

# MIT研究報告「核燃料サイクルの将来」 The Future of the Nuclear Fuel Cycle

An Interdisciplinary MIT Report

Summary Report  
(2010年9月16日発表)

## 目次

研究参加者

MIT核燃料サイクル研究諮問委員会メンバー

前書と謝辞

エグゼクティブサマリー

1. 核燃料サイクルの将来—概観、結論、提言
2. 燃料サイクル問題の構成
3. ウラン資源
4. 使用済み燃料管理
5. 廃棄物管理
6. 燃料サイクルの分析
7. 経済性
8. 燃料サイクルと不拡散
9. 燃料サイクル技術の現状
10. 原子力発電と放射性廃棄物についての米国の態度
11. 推奨される分析、研究、開発、実証プログラム

補遺（章とは無関係）

- A. トリウム燃料サイクルオプション
- B. 先進技術
- C. 被覆粒子燃料の高温炉
- D. 世代間の公平

(備考) サマリー報告は2010年9月16日に発表された。

補遺を含む完全な報告書は年内に刊行予定。

# エグゼクティブサマリー

## 研究の背景

MITは2003年に、学際研究報告「原子力発電の将来」(The Future of the Nuclear Power)を発表した。基本的な動機は、原子力発電(今日、米国でゼロカーボン電力の約70%を供給している)が低炭素世界の市場における重要なオプションであるということだった。この研究報告の発表以来、2009年発表の改訂版報告で説明しているように、米国と世界で大きな変化が起きてきた。気候変動への懸念が高まっている。多くの国が大気への地球温暖化ガス排出の制限を採用し、米国でも同様の制限を採用すると期待されている。世界中の原子力発電の成長予測が劇的に増大し、新規原子力発電所の建設が特に中国とインドで加速した。「核燃料サイクルの将来」に関する研究を行ったのは、低炭素オプションとして原子力発電が引き続き重要だからである。原子力は、気候変動リスクを緩和する手段として大規模に、即ち今世紀半ば迄に世界的にテラワット(10億kW)規模で、開発することができる。

原子力の拡大を可能にするためには、現在の卓越した安全性と信頼性の良好な実績を維持しつつ、コスト、廃棄物処分、および核不拡散という重大な課題を克服しなければならない。比較的短期的には、核燃料サイクルの発展に関して、広範かつ長期的な視点から重要な決定が行われることになる。具体的には、どんなタイプの燃料、どんな型の原子炉が使用されるのか、使用済み燃料をどうするのか、長期的な放射性廃棄物の処分方法などについてである。この研究は、それらの決定に資する情報を提供することを目的としている。

何十年もの間、最終的には高速炉のプルトニウム利用に基づくクローズド燃料サイクルが展開されるだろうという予測のもとに、将来の燃料サイクルについての議論が行われてきた。しかしながら、この予測はウラン不足になるという時代遅れの理解に根ざしている。我々が燃料サイクルについて再検討した結果、より多くの実行可能な燃料サイクルオプションがあること、そしてそれらの最適な選択が大きな不確実性に直面していることが分かった。具体的には、新型炉コストの経済性、原子力開発規模のような社会的問題、廃棄物管理の技術的問題、不拡散リスクの管理問題などに直面している。

(これらの問題に対する)より明確な解答は、各種代替技術についての必要な研究が行われ、気候変動リスク緩和へ世界が一体となって取り組むと仮定して、今後20~30年の間に得られるだろう。我々の研究に基づく主要なメッセージは、オープン燃料サイクルを続行し、LWR使用済み燃料貯蔵システムを導入し、地層処分を開発し、そして広範な原子力エネルギーの将来に適した代替技術を研究することによって、我々は燃料サイクル選択のためのオプションを保持できるし保持すべきであるということである。

## 研究結果と提言

### 経済性

将来の重要なエネルギーオプションとしての原子力の実現可能性は、経済性に決定的に依存する。原子力発電所の運転コストは低い、資本コストそのものが高い。現在、新規原子力発電所を建設する場合の財政的リスクが大きいと受け取られているために、資本費は建設資金調達の高い費用によって増幅されている。米国における新規ベースロード電源について、原子力発電による平準化発電コストは新規石炭火力(二酸化炭素の回収・貯留なし)あるいは新規天然ガス火力よりも高くなりそうである。この財政リスクプレミアムを排除すると、原子力の平準化発電コストは、石炭火力と競争力を持つ。CO2排出に対して適度な価格が課されると、原子力は石炭より安くなる。このことは、過去のほぼ10年間の燃料価格から見て、天然ガスとの比較についても言える。この分析に基づいて、我々は、新規に建設される最初の原子力発電所のグループに対して、財政的なインセンティブが提供されるべきであると提言した。(しかしながら)2005年以降、米国に導入された先行プラント向けのインセンティブの実施は、極めて遅々としている。

### 提言

現在の状況下で米国に新規原子力発電所を建設するコストを実証する目的で、先行プラントに対するインセンティブの実施を加速すべきである。財政リスクのプレミアムを排除した良好な実績を示す必要がある。このインセンティブ計画は最初の先行プラント(最初の7~10基)以上に拡大すべきでない。というのは、原子力発電は、他のエネルギーオプションと同様に、公開市場で競争できるべきであると信じているからである。

### 燃料サイクル

少なくとも今世紀の大半において新規原子力発電所の建設を抑制するかもしれないウラン資源の不足の懸念はない。

数カ国で行われているMOX燃料を利用したLWRでの限定的なリサイクルによる資源拡張と廃棄物管理におけるメリットは、ごくわずか(最小限)である。

科学的に健全な方法は、使用済み燃料を管理することである。

### 提言

今後数十年間、軽水炉利用のワンスルー燃料サイクルは、米国にとって望ましい経済的オプションであり、今世紀大半は、米国と多くの他の国の原子力システムでも支配的な特徴となるであろう。燃料資源の利用効率を増加させ、将来の原子炉プラントのコストを削減するための軽水炉設計の改良が、主要な研究開発の焦点となる。

## 使用済み燃料管理

長期的な管理貯蔵は、比較的少ないコストで、使用済み燃料利用のための将来のオプションを保持する。オプションを保持することが大切である。なぜなら、時間がたつにつれて主要な不確実な事項（新型炉と燃料サイクル技術の利用可能性、コスト）が解決されて、軽水炉使用済み燃料を直接地層処分される廃棄物と考えるべきか、又は未来のクローズド燃料サイクルの貴重な燃料資源と考えるべきかが決定されるからである。

将来の燃料サイクル選択のためのオプションの保持は、燃料サイクル政策の討論で過小評価されてきた。管理貯蔵は、運転中の発電所サイト、集中貯蔵施設、あるいは回収可能なように設計された地層処分場（集中貯蔵の代替方式）で安全に実施できる。

### 提言

**使用済み核燃料の長期的な（約1世紀の間の）管理貯蔵の計画立案が、核燃料サイクルデザインの不可欠な部分となるべきである。管理貯蔵はこれらの期間、安全であると信じているが、安全貯蔵と輸送機関を確認し伸ばすためR&Dプログラムに傾注すべきである。**

**原子炉の予想運転期間よりも長い1世紀にわたって貯蔵するということは、米国が使用済み燃料の集中貯蔵サイトへ向かうべきことを示唆する。集中貯蔵サイトは、廃炉からの使用済み燃料の受入れからスタートし、長期の使用済み燃料管理戦略を支援する。**

これは、1998年より原子炉サイトから使用済み燃料の引き取りを開始するという連邦政府の責任問題を解決するという付加的な利益をもたらす。

## 廃棄物管理

使用済み燃料中の幾つかの長寿命核種には永久的な地層隔離が必要であるので、地層処分のシステムの開発を引き続き行う必要がある。長期的な地層隔離を支持する科学的基盤が健全であるという2003年のMIT報告の結論は、現在でも有効である。

使用済み核燃料と高レベル廃棄物の地層処分場の立地は、米国にとって大きな挑戦だった。米国と欧州における失敗と成功の事例は、放射性廃棄物管理組織には以下の特性を有するべきであると示唆している：(1) 州及び地元自治体との連携によるサイト選定の権限、(2)放射性廃棄物処分基金の管理権限、(3)使用済み燃料及び廃棄物の除去に関する施設所有者との交渉権限、(4)放射性廃棄物の流れに影響する燃料サイクルの選択に関わる政治家、規制者との関係、(5)管理の長期継続性。これらの特性はこれまでの米国の計画には見られなかった。成功している廃棄物管理プログラムの大切な鍵は科学に基づいた決定の一貫性である。

### 提言

**我々は、国の廃棄物管理プログラムを実行するために、新しい準政府の廃棄物管理組織の設立を提言する。**

クローズド燃料サイクルデザインは、廃棄物がどう管理されるかではなく、原子炉に戻ることに（訳注：

燃料の再利用)に焦点を当てていた。

## 提言

**我々は、(1)廃棄物管理と燃料サイクルデザインの統合化、(2)燃料サイクルと廃棄物管理決定の完全なカップリングを可能にする廃棄物管理のR&Dプログラム、を提言する。**

重要な結論は、米国がハザードよりむしろ発生源(ソース)によって多くの放射性廃棄物を分類していることである。このことで既に廃棄物の処分経路でギャップができており、この問題は代替燃料サイクルでさらに悪化する。

## 提言

**全ての廃棄物を成分によって分類し、リスクに応じて処分方法を定義する、リスク情報に基づく総合的な廃棄物管理システムの採用を提言する。**

## 将来の核燃料サイクル

核燃料サイクル(オープン、クローズド、或いは限定的な使用済み燃料リサイクルによる部分的クローズド)の選択は、(1)我々が開発する技術と(2)社会が目標とする重要性(安全、経済性、廃棄物管理、及び核不拡散)による。いったん選択をすると、それらは主要で非常に長い期間にわたって原子力開発に影響力を持つ。現在、我々は、最善のサイクルと関連技術についてインフォームド・チョイスをすることができるくらいの十分な知識を持っていない。

2100年迄を見通した原子力成長シナリオのための代替燃料サイクルを分析したところ、燃料サイクル選択における幾つかの直接的かつ重要な結果が分かった：

- 燃料サイクルの移行には50~100年かかる。
- 今世紀中は総超ウラン在庫或いはウラン需要に殆ど差はない。
- 標準的なプルトニウム生成のクローズド燃料サイクルで、今世紀、原子力成長シナリオ達成するためには、多くのLWRが必要である。

重要な結論は、非常に高い転換率(核分裂性物質の生成量を核分裂性物質の炉心装荷量で割った値)を持つ原子炉は、ウランとトリウム資源の完全利用を可能にする持続可能なクローズド燃料サイクルにとって必要ではないということである。1に近い転換率で許容され、以下のような代替燃料サイクルへの道を開かれる：

- 重要な政策的意味と潜在的な低コストの視点から、クローズド燃料サイクルのための従来型高速炉より、ハードスペクトルLWRのような非常に異なった原子炉の選択
- 高濃縮ウラン或いはプルトニウムよりもむしろ低濃縮ウランで高速炉を始動。これによって、クローズド燃料サイクルのための軽水炉使用済み燃料の再処理の必要性が排除される。

オープン燃料サイクルから移行して、原子力展開のためのどの選択を行うにしても、それまでにまだ

十分な時間がある。しかしながら、多くの実行可能な技術的な選択肢は検証する必要があり、原子力ビジネスにおける新しい商業オプションを確立するには長い時間がかかる。従って、今世紀の半ばに代替燃料サイクルオプションを可能にするために、R&Dを活発に進めるべきである。

### **提言**

**数年後には、実行可能な技術オプションの決定し、各種決定のタイムラインを明確にし、進むべき進路の基礎として限定されたオプションを選定することができるように、革新的な原子炉と燃料サイクルオプションに関する総合システム研究と実験を積極的に実施すべきである。**

### **核不拡散**

核拡散は制度上の課題である。民生用核燃料サイクルは核兵器物質取得への幾つかのルートの一つとなる。濃縮及び/又は再処理能力の確保は、核拡散の懸念となるが、小規模な原子炉プログラムにとっては経済的選択ではない。しかしながら、核燃料の供給保証は、原子力発電を開始する国にとっては重要である。廃棄物管理は多くの国にとって重要な挑戦である。

### **提言**

**米国と他の原子力供給国は、小規模の原子力計画を持つ国に燃料をリースするオプションを進めるべきである。その他、濃縮を差し控えるための経済的インセンティブの付与、新型炉の技術協力、使用済み燃料の引取り（供給国の使用済み燃料管理枠組みの中で引き取り）、また、（恐らく10年）燃料リースする代わりに一定期間での再生可能エネルギーへコミットするオプションの提供。**

### **研究開発と実証（RD&D）**

主要な新しい原子力技術を研究し、開発し、実証し、許認可し、展開するには数十年が必要である。米国が、燃料サイクルについて賢明な戦略的選択ができるように、時宜にかなって燃料サイクルオプションが十分に開発されている必要があり、このために、相当規模の原子力拡大開発と一体となり、強固な研究、開発、実証（RD&D）プログラムの実施が必要である。2010年のDOEのロードマップは、以前のプランよりかなり改善されている。

### **RD&D優先度の提言**

- ・ LWRのパフォーマンスと燃料の性能アップ。
- ・ 過去数十年間追求されてきたものよりはるかに広範な使用済み燃料貯蔵と放射性廃棄物処分のオプション。
- ・ 技術オプション開発とオプション間のトレードオフを理解するためのモデリングとシミュレーション能力。
- ・ 産業応用へのプロセスヒートの提供とモジュール炉の開発を含む革新的な原子力利用と概念。
- ・ 革新的な燃料サイクルと原子炉の研究開発を可能にするための材料試験施設や他の主要な施設などの研究開発インフラの再建。

我々は、研究開発とインフラ・プログラムをサポートするのに、年間約10億ドルが適切であると見積もっている。適切な時期に大規模な政府・産業界による実証プロジェクトを立ち上げるには追加の資金が必要になる。

## 研究参加者

### 共同議長

- Mujid Kazimi** Tokyo Electric Professor of Nuclear Engineering  
–co chair Director, Center for Advanced Nuclear Energy Systems  
Department of Nuclear Science and Engineering  
Department of Mechanical Engineering
- Ernest J. Moniz** Department of Physics  
–co chair Cecil and Ida Green Professor of Physics and of Engineering Systems  
Director MIT Energy Initiative
- Charles W. Forsberg** Executive Director MIT Fuel Cycle Study  
Department of Nuclear Science and Engineering

### 研究グループ

- Steve Ansolabehere** Professor of Government, Harvard University
- John M. Deutch** Institute Professor, Department of Chemistry
- Michael J. Driscoll** Professor Emeritus, Department of Nuclear Science and Engineering
- Michael W. Golay** Professor of Nuclear Science and Engineering
- Andrew C. Kadak** Professor of the Practice, Department of Nuclear Science and Engineering
- John E. Parsons** Senior Lecturer, Sloan School of Management, MIT  
Executive Director, Center for Energy and Environmental Policy Research and  
the Joint Program on the Science and Policy of Global Change
- Monica Regalbuto** Visiting Scientist, Department of Nuclear Science and Engineering  
Department Head, Process Chemistry and Engineering,  
Argonne National Laboratory

### 寄稿者

- George Apostolakis** Korea Electric Power Company Professor of Nuclear Engineering  
Department of Nuclear Science and Engineering  
Department of Engineering Systems
- Pavel Hejzlar** Program Director, CANES  
Principal Research Scientist  
Department of Nuclear Science and Engineering
- Eugene Shwageraus** Visiting Associate Professor  
Department of Nuclear Science and Engineering

### 学生研究助手

- Blandine Antoine  
Guillaume De Roo  
Bo Feng  
laurent Guerin  
Isaac Alexander Matthews  
Lara Pierpoint  
Behnam Taebi  
Keith Yost

## MIT燃料サイクル研究諮問委員会メンバー

<b>Phil Sharp, Chair</b>	President, Resources for the Future Former member of Congress
<b>James K. Asselstine</b>	Managing Director, Barclays Capital
<b>Jacques Bouchard</b>	Advisor to the Chairman of the Commissariat a l'energie atomique et aux energies alternatives (CEA)
<b>Marvin Fertel</b>	President and CEO, Nuclear Energy Institute
<b>Kurt Gottfried</b>	Chairman Emeritus of the Union of Concerned Scientists
<b>John Grossenbacher</b>	Director, Idaho National Laboratory
<b>Jonathan Lash</b>	President, World Resource Institute
<b>Richard a. Meserve</b>	President, Carnegie Institution for Science
<b>Cherry Murray</b>	Dean of the School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University
<b>John W. Rowe</b>	Chairman and CEO, Exelon Corporation
<b>Maxine L. Savitz</b>	Vice President, U.S. National Academy of Engineering
<b>Steven R. Specker</b>	President and CEO, Electric Power Research Institute
<b>John h. Sununu</b>	JHS Associates, Ltd.

諮問委員会メンバーは、研究グループに対して貴重な視点や助言を提供したが、本研究で取り上げた一つ以上の事項について夫々異なる見解を有している。諮問委員会メンバーは、本報告の研究結果や提言を個人的にも集団的にも承認するよう要請されていない。

スコウクロフトグループの**Daniel Poneman**は、大統領指名による政府高官に就任したため諮問委員会を辞任した。