

技術報告



Feasibility Study on Commercialized FR Cycle Systems

高速増殖炉サイクルの特性評価

篠田 佳彦 大滝 明 小藤 博英*
小野 清 平尾 和則

大洗工学センター システム技術開発部

Study on Evaluation of Fast Reactor Cycle

Yoshihiko SHINODA Akira OHTAKI Hirohide KOFUJI*
Kiyoshi ONO Kazunori HIRAO

System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズ I (1999年～2001年3月)において実施した各種サイクルシステム概念の特性評価作業報告の一部について報告する。まず、経済性、資源有効利用性、安全性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、技術的実現性の六つの視点から総合的に評価するための「多面的評価手法」の開発について述べる。また、長期的な物質収支解析について、さらに最近、燃料電池用に注目されている「水素製造に高速増殖炉を利用するシナリオ」についての検討について述べる。

This report is intended to explain some results of the characteristic evaluation work on various fast reactor cycle system concepts, in the 1st phase of JNC's "Feasibility Study on the Commercialized Fast Reactor Cycle System" (from 1999 to March 2001). The development of the evaluation method was carried out from the six perspectives of Economics, Effective utilization of uranium resources, Reduction of environmental impact, Safety, Proliferation resistance and Technological feasibility. Then, long-term nuclear material mass flow was analyzed and the scenario for the "fast reactor application for the hydrogen production" was examined.

キーワード

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究, 多面的評価, 物質収支解析, 水素製造

Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System, Multi-Criteria Evaluation, Mass Flow Analysis, Hydrogen Production



篠田 佳彦

FBRサイクル解析グループ所属
副主任研究員
FBRサイクルの特性評価に従事
第一種放射線取扱主任者



大滝 明

FBRサイクル解析グループ所属
副主任研究員
FBRサイクル導入シナリオ検討及び諸量評価に従事



小藤 博英

FBRサイクル解析グループ所属
研究員
FBRサイクルの特性評価(酸化水素電解試験設備の整備)に従事
第一種放射線取扱主任者



小野 清

FBRサイクル解析グループ所属
研究主幹
FBR導入シナリオの構築に従事
核燃料取扱主任者, 第一種放射線取扱主任者



平尾 和則

FBRサイクル解析グループリーダ
FBRサイクルシステム技術の統合評価に従事
原子炉主任技術者

*現在：東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部
Presently, Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

1. はじめに

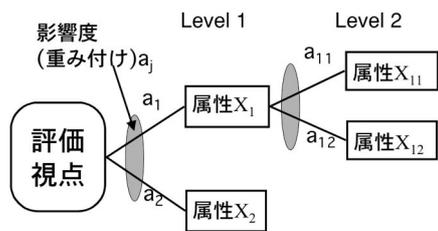
高速増殖炉（以下、FBR）サイクル実用化戦略調査研究では、種々のFBRサイクルシステム概念を幅広く調査、検討することにより、実用化候補概念の抽出を目指している。本報告では、まず、FBRサイクルの性能を多面的な観点から分析する多面的評価手法の開発、続いて、軽水炉体系への導入過程のなかでの時間依存量に着目した時系列解析結果について述べる。

また、21世紀社会におけるFBRサイクルの多目的利用の一例として、燃料電池などによる水素利用社会を想定したFBRサイクルによる水素製造についても述べる。

2. FBRサイクルシステムの多面的評価手法の開発

2.1 評価手法の開発

FBRサイクルの総合的な性能を定量評価するためには、まず、種々の評価視点から、その特性を示す属性（原則的に定量値）を分析し、図1に示す階層的評価構造を構築する。続いて、図2に示すように属性 X_i に対し、その効用値（無次元）を効用関数 $U(X_i)$ として定義する。全属性の効用値を集約して、その後、各属性の影響度による重み付けにより、各効用値を積算し、その評価視点の効用値を得る¹⁾。



$$U = a_1 U_1 + a_2 U_2(X_2)$$

$$= a_1 \{ a_{11} U_{11}(X_{11}) + a_{12} U_{12}(X_{12}) \} + a_2 U_2(X_2)$$

図1 評価構造

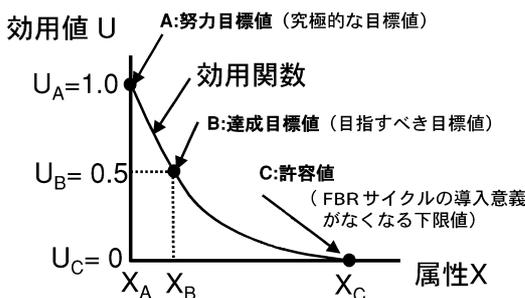


図2 効用関数と目標値

2.2 評価視点と評価構造

フェーズIでは、開発目標として設定した以下の六つの項目を評価視点として選定した。

- 安全性
- 経済性
- 資源有効利用性
- 環境負荷低減性
- 核拡散抵抗性
- 技術的実現性

これらの評価視点は、互いに相互関係があり、複雑に絡み合うものであるが、フェーズIでは、各評価視点を独立なものとして取り扱う。

(1) 安全性

安全性は前提条件であり、設定した達成基準を満足しているか否かが判断基準となる。

(2) 経済性

発電システムの経済競争力は図3のように発電原価により表される。現在価値換算した耐用年平均発電原価を用いることで、発電システムを建設するための投資額、運転操業費などを含んだ形で評価できる。

発電原価に対する効用関数 $U(X)$ として、

X_A (努力目標値): 減価償却後の将来軽水炉の発電原価 = 3.1円/kWh

X_B (達成目標値): 将来軽水炉の発電原価(予想値) = 4.3円/kWh

X_C (許容値): (a)国際CO₂排出権取引LNG 発電原価 = 6.5~7.4円/kWh
(b)自然エネルギーの最安原価(将来風力発電) = 11~13円/kWh

とする²⁾。FBRサイクル導入には、将来の軽水炉発電原価と比肩する経済性が必須である。発電原価においては、以下を許容値とする。

- (a)は基幹電源を競合相手とした場合
- (b)は再生可能性、クリーン性の観点で、競合する自然エネルギーの中で最も安価となり得ると評価されている風力発電の原価

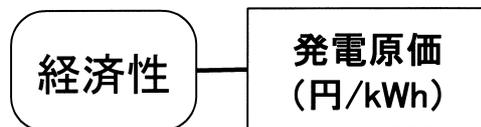


図3 経済性の評価構造

(3) 資源有効利用性

FBRサイクルの特徴は、エネルギーを生産しながら、エネルギー資源を生成できることであり、資源有効利用性は、ウラン資源に着目して評価する。図4に評価構造を示す。

想定した日本国内の将来原子力発電設備容量に対し、FBRサイクルを導入することで節約できるウラン量に着目し、ウラン累積需要量により資源節約性を評価する。すなわち、世界に占める日本の原子力発電累積電力量の割合は、現在から2070年～2090年頃までで、約5%と予想される。使用可能と考えられる天然ウラン量を既知（又は、究極）ウラン資源³⁾と比較して、以下のとおり目標値を設定する。なお、日本国内の原子力発電設備容量についても需要量とFBR導入開始時期をパラメータとし、数ケース設定する。

X_α(努力目標値)：既知資源の5%約20万トン

X_β(達成目標値)：

(a) 既知資源の10%約40万トン

(b) 究極資源の5%約77万トン

X_γ(許容値)：究極資源の10%約154万トン

一方、資源活用性（ウラン利用率）は、ウラン使用におけるFBRサイクルの潜在的能力を評価するものである。そこで、全世界における長期的な原子力発電累積電力量を想定し、その累積電力をすべて天然ウランの核分裂で生成するとした場合に必要なウラン量と世界の既知資源に占める割合を資源活用性の属性とする。なお、原子力発電累積電力量の想定は、

$(\text{総人口}) \times (\text{一人当たりの最終エネルギー消費量}) \times (\text{電力化率}) \times (\text{原子力発電比率})$

から算出した。効用関数を表1に示す。

(4) 環境負荷低減性

環境負荷としては、放射性物質による環境への負荷を取り上げ、「固化・隔離」と「希釈放出」との2経路の被ばく量により評価する⁴⁾。前者は、処分後長期間経過後に処分場周辺への、後

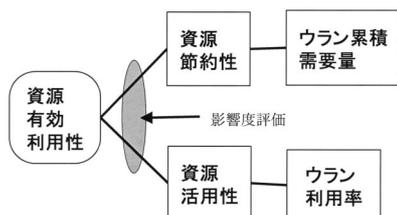


図4 資源有効利用性の評価構造

者は、操業時に施設周辺環境への負荷となる。また、固化・隔離された放射性廃棄物の発生量（体積）と内在する放射性毒性を属性とする。廃棄物処分体の発生量は、処分場面積に直結し、環境負荷低減性の視点から、影響の高いものと考えられる。廃棄物処分体の放射性毒性は、潜在的毒性とも称され、処分体の負荷を示す尺度として良く用いられる。評価構造を図5に、効用関数を表2に示す。処分場からの核種移行による被ばく量の効用関数は、処分後の被ばくが長期に及ぶ事もあり、被ばく影響時間に対する扱いなど、詳細は検討中である。

(5) 核拡散抵抗性

核拡散抵抗性については、属性の連携関係が複雑で相互依存性が強く、階層化した評価構造を導くことは難しい。そのため、定量的評価を実施することは困難と判断し、候補システムの特徴を分析するチェックシートを作成した。今後、定量化や評価方法について検討する。

(6) 技術的実現性

候補概念の評価で重要な位置づけとなる視点で

表1 資源活用性（ウラン利用率）の効用関数

| 項目 | 原子力発電 累積電力量 | 必要な ウラン量 | 既知資源に 対する割合* |
|------------------------|----------------|-------------|-----------------|
| | 万TWh | 万ton | % |
| X _α (努力目標値) | 3760 | 438 | 110 100 |
| X _β (達成目標値) | 1040 | 121 | 30 |
| X _γ (許容値) | 240 | 28 | 7 |

*既知資源の何%を分裂利用すれば、想定累積電力を発生しえるか

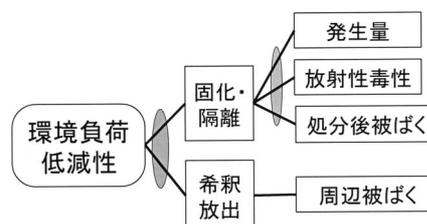


図5 環境負荷低減性の評価構造

表2 環境負荷低減性の効用関数

| | 発生量 | 放射性毒性 | 周辺被ばく |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| X _α (努力目標値) | 1/100 | 1/100万 | 1μ Sv/y |
| X _β (達成目標値) | 1/10 | 1/1000 | 5μ Sv/y |
| X _γ (許容値) | 1 | 1 | 50μ Sv/y |
| 備考 | 基準システムからの削減度 | 基準システムからの削減度 | 100万KWで1年間運転 |

あるが、実現への成功確率、開発リスクなどの特性を示す属性の値を現在の設計情報から算出することは困難であることから、フェーズⅡの検討課題とした。

2.3 評価手法の適用性検討

検討対象としたFBRサイクルの仕様を表3に示す。現段階では、評価手法自体が開発中であり、設計情報も概念検討レベルのものであるため、本節の検討は、評価手法自体の適用性評価を目的としている。経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性について、設計情報から評価視点ごとに属性の効用値を算出した。また、すべての属性の影響度を同一と仮定し、評価視点の効用値を試算した。

図6に各概念の経済性からの効用値の検討結果を示す。なお、ここに示した結果は、ある設計例に対するものであり、炉型などの一般的な性質を代表するものではない。鉛ビスマス冷却炉(F1, F2)は、自然循環冷却方式を採用しているため、原子炉系の物量が大きいことなどから、発電原価が相対的に高く、効用値は小さくなっている。炭酸ガス冷却炉(G1, G2)も、主冷却系の物量が大きく、かつ、大容量のガス循環機は所内負荷が大きいことから、効用値が相対的に低くなっている。非均質炉心の採用により増殖比は僅かに向上するが、そのため内部ブランケット燃料などの装荷量が増加し、効用値は減少している(非均質、

表3 検討対象のFBRサイクル概念

| ケース | 炉型 | 炉心 | 燃料形態 | 再処理 | 燃料製造 | |
|-----|----------|-------|------|--------|-------|------|
| A1 | Na大型 | 非均質*1 | 酸化物 | 先進湿式 | ペレット | |
| B1 | | | | 先進湿式 | 振動充てん | |
| A3 | | | | 従来湿式 | ペレット | |
| B2 | | | | 酸化物電解 | 振動充てん | |
| B3 | | | | 金属電解 | 振動充てん | |
| B4 | | | | フッ化物揮発 | 振動充てん | |
| A2 | | | | 均質*2 | 先進湿式 | ペレット |
| C1 | | | | 非均質*1 | 金属 | 金属電解 |
| E1 | Na中型 | 非均質*1 | 酸化物 | 先進湿式 | ペレット | |
| E2 | | | | 金属 | 金属電解 | 射出成型 |
| E3 | | | | 均質*2 | 先進湿式 | ペレット |
| F1 | Pb Bi 中型 | 均質*2 | 窒化物 | 先進湿式 | ペレット | |
| F2 | | | | 金属電解 | 振動充てん | |
| G1 | CO2 大型 | 均質*2 | 酸化物 | 先進湿式 | ペレット | |
| G2 | | | | | | 窒化物 |
| H1 | He大型 | 均質*2 | 窒化物 | 先進湿式 | ペレット | |

* 1 径方向非均質炉心 * 2 均質炉心

均質炉心の違い、A1とA2の比較)

図7に資源有効利用性の視点から検討した結果を示す。資源節約性においては、鉛ビスマス冷却炉(F1, F2)では、燃料量が多いため、軽水炉からの移行が進まず、ウラン累積需要量が多くなる。炭酸ガス冷却炉(G1, G2)は酸化物燃料(G1)については資源節約性が劣っているが、窒化物燃料(G2)では増殖比が大きいため、資源節約性はナトリウム冷却炉と同程度となっている。ウラン活用性については、どの概念もかなり高い値となっている。マイナーアクチニド(以下、MA)を回収しない従来湿式再処理を採用したA3が若干低い値を示している。

環境負荷低減性に関する検討結果は、図8に示

経済性からの効用値

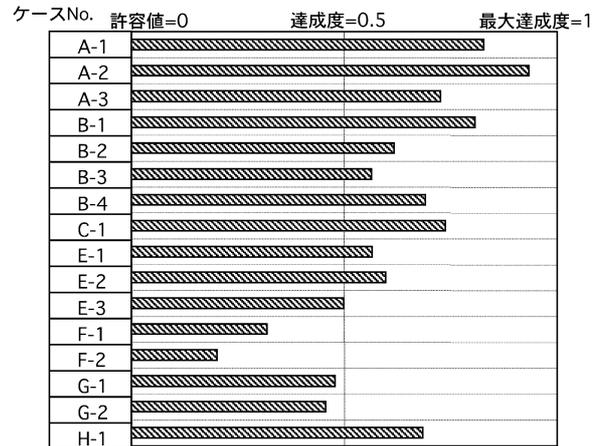
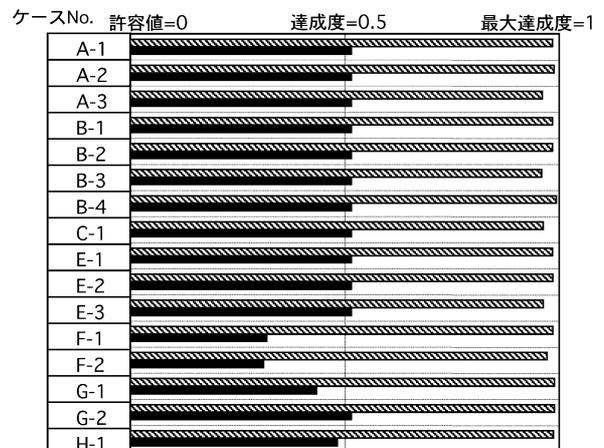


図6 経済性に関する検討結果

資源有効利用性からの効用値

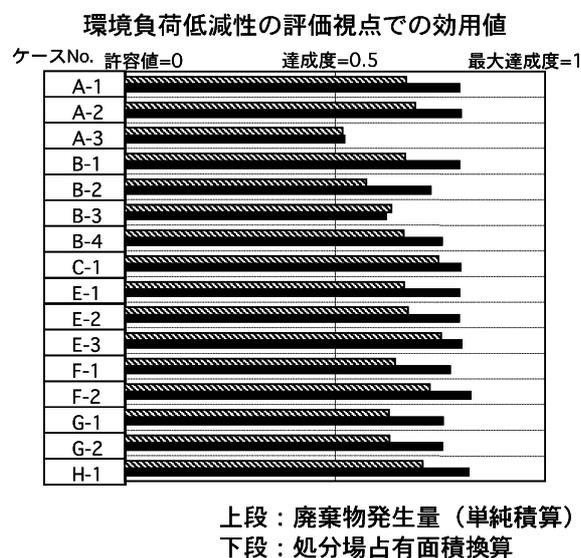


上段：資源活用性
下段：資源節約性

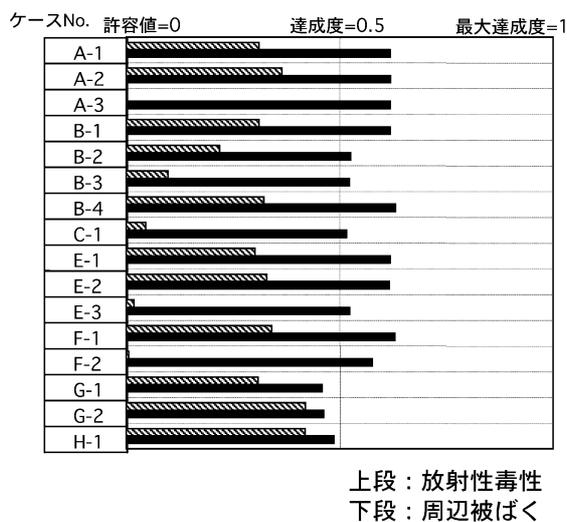
図7 資源有効利用性に関する検討結果

すとおりである。廃棄物発生量については、廃棄物の放射能レベルを問わず、高レベルから低レベル廃棄物までの発生量を単純に積算したものと、処分方法に応じて廃棄物発生量（体積）が占める処分場の占有面積に応じた重みを廃棄物レベルごとに乘じて積算したものを示す。廃棄物レベルに応じた廃棄物発生量（体積）と処分場占有面積比率については、処分場設計に依存するパラメータであるので、ここに示したものは、暫定的な値を用いた。

廃棄物発生量の不確かさが大きく、また、放射性毒性に関してもアクチノイド元素のごく僅かな回収率の差違（再処理で、0.992～0.998程度、燃料製造で0.999～0.995程度の差）による違いを現時



(1) 廃棄物発生量



(2) 放射性毒性と周辺被ばく

図8 環境負荷低減性に関する検討結果

点で言及してもあまり意味がないと考えられる。逆に、放射性毒性や放出による被ばく量などでは、設計値の僅かな違いにより評価結果が大きく異なったものとなることを示しているといえる。

環境負荷低減性の属性については、設計情報の僅かな違いが増幅して現れることが多く、かつ属性値の評価結果への感度も高いことなどから、今後できるだけ精度の高い設計情報の算出が評価の正否を握っている。

個々の評価視点ごとの試算結果を集約した結果を図9に示す。これによると、経済性の分布が大きく、資源有効利用性と環境負荷低減性においては、顕著な差違は現れていない。これは、今回検討とした候補概念は、燃焼度、増殖比など資源有効利用性での開発目標として同様な仕様の設計例であること、環境負荷低減性においては、特別な環境負荷低減対策を盛り込んでいないことによるものであることから、検討対象システム間の特性に顕著な差違が生じなかったものである。今回の評価手法を適用し、影響度の高い性能差の部分については正確に評価結果の違いとして現れること、逆に性能差の違いの影響が低い部分は評価結果に大きな差違が現れないことを表現していることは、手法の正当性を示しているといえる。

3. FBRサイクル概念のサイクル諸量評価

3.1 評価の目的

サイクル諸量評価の目的は、フェーズIで抽出されたシステム要素技術（原子炉、燃料製造及び再処理）を統合した複数のFBRサイクル概念の特徴を、プルトニウム需給量、天然ウラン累積需要量、使用済燃料貯蔵量等の長期的な物質収支の観

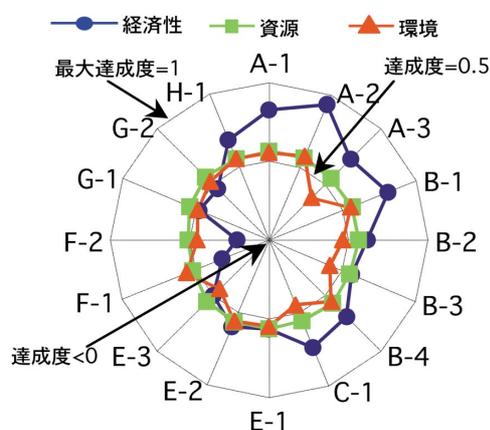


図9 多面的な評価手法による試算結果

点から明らかにすることにある。

さらに、各概念に適したFBRサイクルの導入時期や施設規模の定量化を図り、ウラン資源の有効利用、エネルギーセキュリティ、核不拡散への配慮を踏まえた核燃料サイクル全体の将来シナリオを具体的に提示し、将来シナリオと整合性をもつFBRサイクル概念やリサイクル特性を設計部門にフィードバックすることを目指している。

3.2 サイクル諸量の時系列解析

(1) 評価ケースと前提条件

検討した八つの代表的なFBRサイクル概念(表4)を評価対象として、原子力発電設備容量、FBR導入時期、再処理導入計画等の前提条件を統一し、西暦2200年までの国内におけるFBR導入規模、天然ウラン累積需要量及びMA蓄積量の比較を試みた。

本解析では、ケース1(ナトリウム冷却炉)及びケース4~7(鉛ビスマス炉、炭酸ガス炉、ヘ

リウム炉、水炉)については、主に増殖比や核分裂性プルトニウムの炉内量の違いによる影響を確認する。ケース2では軽水炉回収MAを装荷した効果について、ケース8ではコロケーション(炉と燃料サイクルを併設する概念)との差異をそれぞれ比較する。

解析に当たっては、サイクル機構が開発したサイクル諸量解析コードFAMILY EX(MA)を使用し、²⁴¹Puの崩壊を考慮に入れてプルトニウム収支を計算した。

前提条件の概要を表5に示す。主要項目については以下のとおりとした。

① 原子力発電設備容量

2010年までの発電設備容量は、62GWe程度にとどまると予想されている⁷⁾。2010年以降の長期見通しについては、GDPや生産年齢人口等の指標を用いて独自に長期的な一次エネルギーの需要予測を行い、その結果を基に、再生可能エネルギーの伸びやCO₂排出制約を考慮に入れて原子力発電設

表4 FBRサイクル概念の代表ケース

| ケース | 炉 型 | | | 再処理方式 | 燃料加工方式 | 備 考 |
|-----|-------------------|-------------------|------|---------------------|-----------|-------------------|
| | 冷却材 | 燃料型 | 単基容量 | | | |
| 1 | Na | MOX | 大型 | 先 進 湿 式 | 低除染ペレット | Na炉 |
| 2 | Na | MOX ^{*1} | 大型 | 酸化物電解法 | 酸化物振動充てん | LWR MA炉 |
| 3 | Na | MOX ^{*2} | 大型 | 先 進 湿 式 | 低除染ペレット | LLFP炉 |
| 4 | Pb Bi | MN | 中型 | 先 進 湿 式 | 低除染ペレット | Pb Bi炉 |
| 5 | CO ₂ | MOX | 大型 | 先 進 湿 式 | 低除染ペレット | CO ₂ 炉 |
| 6 | He | MN | 大型 | 酸化物電解法 | 低除染ペレット | He炉 |
| 7 | 水 | MOX | 大型 | 先 進 湿 式 | 低除染ペレット | 水炉 |
| 8 | Na | 金属 | 中型 | 金 属 電 解 法 | 射 出 成 型 法 | コロケーション |
| 注記 | * 1 : 軽水炉回収MA装荷燃料 | | | * 2 : 長寿命核分裂生成物装荷燃料 | | |

注) ケース4のPb Bi炉は原子炉冷却材の駆動源に自然循環力を採用しているため燃料集合体線出力が低く、大型の炉心になっている。

表5 サイクル諸量解析の主な前提条件

| 項 目 | 条 件 | 備 考 |
|-----------------|--|---------------|
| 発 電 設 備 容 量 | 2020年に70GWeに達した後、2200年まで一定 | サイクル機構低位ケース |
| FBR 導 入 開 始 時 期 | 2040年 | サイクル機構想定 |
| プルスーマル導入規模 | 2039年まで16~18基相当 ⁵⁾ 2006年~2065年大間運転 | 5) 原子力白書 |
| 再 処 理 導 入 計 画 | L再: SF量に応じて400又は800tHM/年を増設 F再: 4年冷却後全量再処理 | サイクル機構想定 |
| 原 子 炉 寿 命 | 炉型にかかわらず一律60年 | サイクル機構想定 |
| 炉 外 サ イ ク ル 時 間 | LWR系: 6年 ⁶⁾ , FBR系5年(ともに取出後4年貯蔵) | FBR系はサイクル機構想定 |
| リサイクル施設口率 | ケース1~7: 1.3%, ケース8: 1.0% | LWR系: 3.5% |

備容量を設定した⁸⁾。本解析は、発電設備容量の伸びが最も低いケース(2020年に70GWeに達した後、2200年まで一定の低位ケース)を対象に行った。

② 各炉型の導入条件

2000年以降2019年までの間に導入する軽水炉(LWR)は燃焼度4.5~4.9万MWd/tとし、2020年以降に運開するLWRは高燃焼度(燃焼度6万MWd/t)のA LWRと仮定した。プルサーマルは、プルトニウムバランスを考慮しながら、FBR導入開始以前を中心に導入を図るものとし、FBRは2040年から本格導入開始とした。原子炉の寿命は、LWRとFBR等の炉型によらず一律60年と想定した。

③ 再処理施設の導入条件

LWR再処理については、工場の稼働率を高く保つことを前提に、LWR使用済燃料の発生量に合わせて処理規模400又は800トンHM/年の工場を導入すると仮定した。すべてのケースについて、最大1,200トンHM/年規模の導入を想定した。処理は通常のウラン使用済燃料の再処理を優先し、プルサーマル使用済燃料は余力が生じた場合に処理するものとした。一方、FBR再処理は処理能力に制限を設けず、4年冷却後全量再処理を想定した。なお、再処理工場の寿命は40年と仮定した。

(2) 解析結果

代表的なサイクル諸量の解析結果を図10に示す。

① 炉型別FBR導入量

図10(a)に、原子力発電設備容量の前提条件とFBRサイクル概念8ケースのFBR導入量を示した。2040年にFBRの本格導入を開始した後、プルトニウムバランスを考慮しながら最大限の導入を図るとすると、ナトリウム炉(ケース1~3, 同8)では2120年にLWRからFBRにおおむね置き換わる。FBR導入量については、大型炉(ケース1~3)とコロケーション(ケース8)の違いによる有意な差は見られない。

自然循環型の鉛ビスマス炉(ケース4)、炭酸ガス炉(ケース5)及びヘリウム炉(ケース6)がLWRと置き換わるのは22世紀後半に入ってからであり、ナトリウム炉の2120年頃と比較し50年程度遅れがある。この移行期間の差は、ナトリウム炉に比べ各炉型の初装荷核分裂性プルトニウム(Puf)量が多く、かつ複合システム倍増時間が長いことに起因する。増殖比1.24のナトリウム炉(代表ケース1)では、初装荷Puf量は約5トンPuf/GWe、複合システム倍増時間は33年である。鉛ビスマス炉、炭酸ガス炉及びヘリウム炉の増殖比は、ともに1.2程度でナトリウム炉と大差ないが、初装荷Puf量は各々約12.7、約7.7、約7.2トンPuf/GWeであり、複合システム倍増時間は各々65年、57年、68年であり、ナトリウム炉に比べ大きい値をとる。一方、ケース7の水炉は、2200年時点において40%程度の置き換わりにとどまる。水炉の増殖比は1.05、初装荷Puf量は約10.1トンPuf/GWeであり、複合システム倍増時間は189年である。

② 天然ウラン累積需要量

図10(b)に、各FBRサイクル概念を導入した場合のLWRによる天然ウラン累積需要量を示す。

ナトリウム炉を採用しているケース1~3及び8の天然ウラン累積需要量は、LWRが2120年頃には約90万トンUでほぼ飽和に達する。大型炉(ケース1~3)とコロケーション(ケース8)の違いによる有意な差はない。

また、ケース4~6の鉛ビスマス炉、炭酸ガス炉及びヘリウム炉における天然ウラン累積需要量は、それぞれ約140万トンU、約120万トンU、約110万トンUでありほぼ飽和状態に達している。一方、水炉を採用した(ケース7)の天然ウラン累積需要量は、2200年を過ぎても飽和に達すること

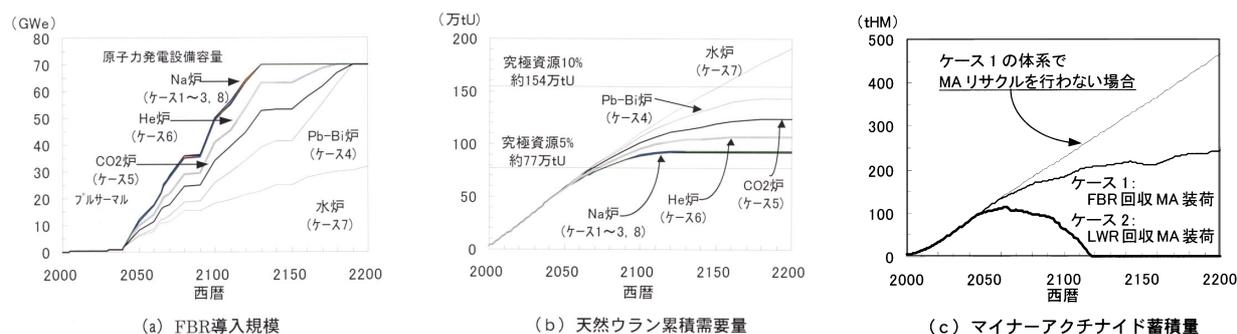


図10 代表的なサイクル諸量の解析結果

はなく、2200年時点で190万トンを超え、ナトリウム炉の2倍に達する。

各ケースの天然ウラン累積需要量と2〔3〕項で述べた資源有効利用性の達成目標〔究極資源の5%（約77万トンU）〕を照合すると、ケース4の鉛ビスマス炉及びケース7の水炉は達成目標である究極資源の5%以下にはほど遠い過剰な累積需要量となる。

MA蓄積量

図10(c)は、ケース1及びケース2のFBRサイクル概念を導入した核燃料サイクル全体のMA蓄積量の時間変化を示している。

ケース1は、炉心燃料にMAを約1%装荷してリサイクルした計算結果である。ケース1における核燃料サイクル全体のMA蓄積量は、ケース1と同じ計算体系でMAリサイクルを行わない場合と比較し6割程度まで減少する。

一方、ケース2は、LWRから回収したMAを約3.7%装荷して燃焼させた計算結果である。核燃料サイクル全体のMA蓄積量は、原子力発電設備に占めるFBRのシェア拡大に伴って徐々に低下し、LWRからFBRへの置き換えが終えた2120年頃におおむねゼロになる。

3.3 サイクル諸量特性の考察

2020年以降の原子力発電設備容量を70GWe一定、FBR導入開始時期を2040年とした条件下で、8ケースについて時系列解析を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ① ナトリウム冷却炉では、導入後約80年間でLWRと置き換わり、天然ウラン累積需要量は資源有効利用性の達成目標（約77万トンU）を1～2割程度超す約90万トンと予想される。
- ② 炭酸ガス冷却炉とヘリウム冷却炉を導入した場合の天然ウラン累積需要量は約110～120万トン、自然循環型の鉛ビスマス炉では約140万トンと予想される。水冷却炉は22世紀を過ぎても天然ウラン累積需要量が飽和せず、2200年時点で190万トンを超え、資源有効利用性の観点では厳しい選択となる。
- ③ 今回の鉛ビスマス炉や水炉のように初期Pu量が大きい炉型は、LWRからのPu供給が支配的なFBR導入初期において新規FBRの導入が制限され、天然ウラン累積需要量の増加につながると共に、処理や加工を行う燃料量が多くなる欠点を

有する。

- ④ 核燃料サイクル全体のMA蓄積量は、FBRによるMAリサイクルにより4割程度減少すると予想される。LWRから回収したMAをFBRで燃焼した場合、MA蓄積量は2120年頃にはおおむねゼロになると見込まれる。
- ⑤ コロケーションを想定した中型モジュール炉の解析では、炉外サイクル時間が等しい大型炉と比較した場合、天然ウラン累積需要量及びMA蓄積量の傾向はほとんど変わらない。

4. 原子力の多目的利用の検討

4.1 検討の概要

近年、新しいエネルギー利用形態の一つとして、水素エネルギーが注目されており、燃料電池、水素燃焼タービン（動力用、電力用）、熱源等の原料としての利用が期待されている。水素は、環境面のみならずエネルギー媒体の輸送や貯蔵としても優れており、従来の送電線に替わって消費地から遠く離れた発電所の電力や熱のエネルギーを化学エネルギーに変換して輸送・分配することや、夜間の余剰電力を水素の形で貯蔵することが可能になるなどの利点をもつ。

原子力エネルギーの多目的利用に関する検討の一環として、従来から提案されている広域的な廃熱利用や中小型炉等を用いた淡水化プラントなどのほかに、水素利用社会を支えるインフラストラクチャーとしてのFBRの可能性についてシナリオ検討を進めている。

4.2 水素利用社会とFBR導入の可能性

水素利用社会に向けた課題は、貯蔵や輸送に係る技術開発とともに、水素供給インフラストラクチャーの整備とされている^{9),10)}。現在、水素ガスは主にナフサや天然ガスを原料にした水蒸気改質法によって製造されている。水素を大量に製造する方法として原子力の電力あるいは熱を利用した概念がいくつか提案されており、水蒸気改質法、電気分解法、熱化学法などが有力と考えられている。

図11は、各エネルギー需要部門における原子力製造水素の利用形態の一例を示している。従来の電力需要（2020年以降70GWe一定）に対して、新たな付加価値として水素供給の役割を担うものである。この原子力の導入規模拡大が天然ウラン資

源需要を加速し、FBR 導入を促すことが考えられる。このほかに、低温水蒸気改質法:SERP法(Symbiotic法)^{11),12)}などのFBRに適した条件(400~500)の水素製造技術が開発された場合、FBRの熱利用による水素生産に結び付く可能性がある。

また、水素の具体的な需要先として、産業部門、民生部門及び運輸部門について各部門ごとに検討を行った。特に、燃料電池自動車の普及による水素の大規模利用が期待される運輸部門においては、原子力の追加導入規模の定量解析を試みた。各エネルギー利用部門における水素需要の見通しと、CO₂がほとんど排出されない電気分解法で水素製造を行う場合の原子力の追加導入規模を以下に示す。

(1) 産業部門

現在、産業部門における水素利用の中心は、アンモニアやメタノールの合成用として利用されており、また、石油精製や石炭液化の分野で燃料の改質用として、情報産業分野では電子製品の材料として利用されている。アンモニアとメタノールの合成及び石油の精製の3分野で、現在の日本又は世界の年間水素需要量の8~9割を占める。

産業部門では、将来の水素利用の可能性として、以下の二つのケースを評価した。

鉄鋼業での還元剤としての利用ケース

2050年頃の産業部門の最終エネルギー需要量

は、現在と大差ないと想定する。現在の鉄鋼業における最終エネルギー需要は、産業部門の中の24%を占め、そのうちの約半分(約19,000×10¹⁰kcal)がコークスの需要となっている。将来、この高炉におけるコークス使用量の20~50%を水素に置き換えると仮定すると、7~18GWeの原子力発電所の追加導入が必要となる。

② 産業部門のボイラー燃料としての利用ケース

現在の産業部門の最終エネルギー需要は燃料としての利用が約80%を占めており、ボイラー用としては産業部門の中の18%(約30,000×10¹⁰kcal)を占めている。将来、このボイラー用重油の使用量の50~100%を水素に置き換えると仮定すると、31~62GWeの原子力発電所の追加導入が必要となる。

(2) 民生部門

現在、民生部門では都市ガスへの水素の混入利用などがあるものの、水素需要量は産業部門に比べて著しく低い。将来の水素利用の可能性として、以下の二つのケースに絞って評価した。

① 家庭部門の暖房用及び給湯用への利用ケース

現在の家庭部門の冷暖房用及び給湯用エネルギーは民生部門全体の34%を占める。エネルギー源別では、灯油は民生部門全体の13%を占めており、そのほぼ全部が家庭部門の冷暖房用及び給湯

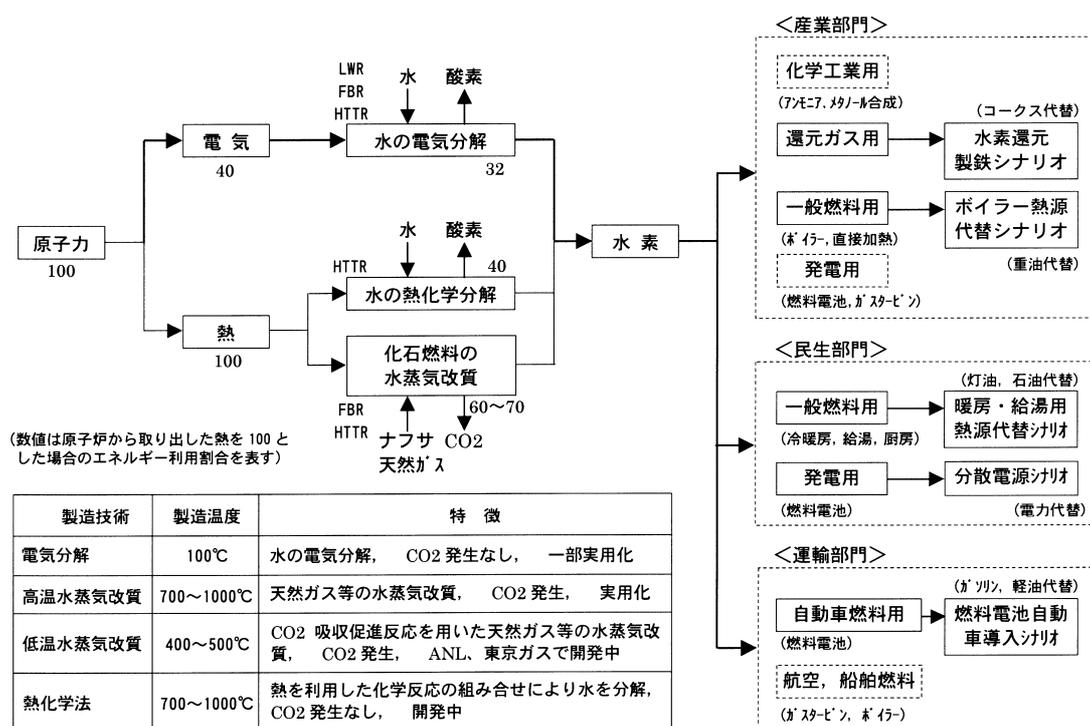


図11 各エネルギー需要部門における原子力製造水素の利用形態

用のエネルギー源(約 $12,500 \times 10^{10}$ kcal)として利用されている。民生部門における将来の最終エネルギー需要の伸び(現在の約1.4倍)を考慮に入れて、この灯油の使用量の50~100%を水素に置き換えると仮定すると、16~32GWeの原子力発電所の追加導入が必要となる。

② 業務部門の暖房用及び給湯用への利用ケース

現在の業務部門の冷暖房用及び給湯用エネルギーは、民生部門全体の37%を占める。エネルギー源別では、石油は民生部門全体の16%を占めており、そのほぼ全部が業務部門の冷暖房用及び給湯用のエネルギー源(約 $15,000 \times 10^{10}$ kcal)として利用されている。民生部門における将来の最終エネルギー需要の伸び(現在の約1.4倍)を考慮に入れて、この石油の使用量の50~100%を水素に置き換えると仮定すると、19~39GWeの原子力発電所の追加導入が必要となる。

(3) 運輸部門

運輸部門における水素利用の可能性として、水素を搭載した燃料電池自動車(以下、水素FCV)が考えられる。水素FCVの本格導入が見込まれる今後50年~100年¹³⁾先の運輸部門の自動車保有台数や水素FCV導入ペースなどをパラメータ条件とし、水素製造用原子力プラントの設備容量、運輸部門のCO₂削減量及び消費端での石油資源節約量について定量評価を行った。図12に、評価結果の一例を示す。

① 水素FCVの導入見通し

図12(a)に示した水素FCVの導入量は、予め西暦2100年までの乗用車、バス及び貨物ごとの保有台数を国内人口構成¹⁴⁾やGDPの推計を基に設定し、これに日本エネルギー経済研究所による2020年までのFCV普及予測¹⁵⁾を参考とする独自の水素FCV導入ペースを用いて算出した。運輸部門の全自動車水素FCVに置き換わる時期は2050年~2060年頃と予想される。また、自動車保有台数は人口の減少(生産年齢人口と老年人口を対象)に伴って2030年以降緩やかに低下していくと考えられる。

② 原子力設備の追加導入規模

原子力設備の追加導入規模は、まず水素FCVのエネルギー消費量を前出の水素FCV導入台数とエネルギー総合工学研究所が公表している水素FCVの航続性能¹⁶⁾から算出し、貯蔵・充填効率、水素製造効率を考慮したエネルギー供給量(低温水蒸気改質法の場合は熱量、水電気分解法の場合は電力

量)を求め、設備稼働率90%と仮定して算出した。低温水蒸気改質法を用いた場合の設備容量は、熱エネルギー供給量を基に電力供給設備相当量に換算した。図12(b)は、サイクル機構が独自に試算した電力供給用と水素製造用の各設備容量の長期見通しを示している。水素製造用の追加設備容量は、低温水蒸気改質法では2050年過ぎに最大約28GWe、水電気分解法では同じく63GWe程度と試算され、後者の水素製法を採用した場合、電力供給用を含めた全設備容量がほぼ中位ケース(2050年以降120GWe一定)に相当することが分かった。

③ 水素FCV導入効果

図12(c)には、水素FCV導入ケースと、石油系燃料の内燃機関型車両を継続導入したケースとについて、運輸部門におけるCO₂排出量を示している。運輸部門の自動車を排出源とするCO₂は、水素FCVの導入により2055年時点で約5,352万t Cの削減が見込まれる。一方、発電部門のCO₂排出量は、原子力発電電力量の増加により約277万t C増えるが、エネルギー利用分野全体を視野に入れた場合の削減量は約5,075万t Cになる。このCO₂削減量は、1998年度国内総排出量3億370万t C¹⁷⁾の約17%に相当する。水素製造のために増加するCO₂排出量約277万t Cは、1998年度発電部門のCO₂排出量9,740万t C²²⁾に対してわずかに2.8%の増加にとどまる。この増加分は石炭火力発電所2.3GWe(熱効率55%、稼働率70%想定)の削減で補うことができる。

また、水素FCV導入による消費端での石油資源の節約量は、2050年~2060年のピーク時において6,000万kl~9,000万kl程度の規模になると見込まれる。この節約規模は我が国の石油備蓄量8,805万kl(1999年度の国と民間の総量¹⁸⁾)におおむね相当する。

5. おわりに

フェーズI作業の一環として、候補概念設計作業を受け、各種サイクルシステム概念の特性評価作業を実施した。

システム概念の特性評価としては、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、技術的実現性について、視点ごとに、各設計の目標達成度(例;発電原価など)を評価する際の「指標」(例;発電原価を原子炉建設費、燃料加工費などに分解)の構造を特定し、併せて、

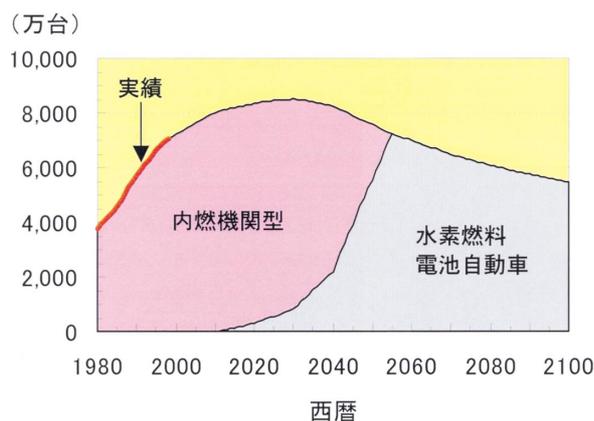


図12(a) 水素燃料電池自動車の導入見通し

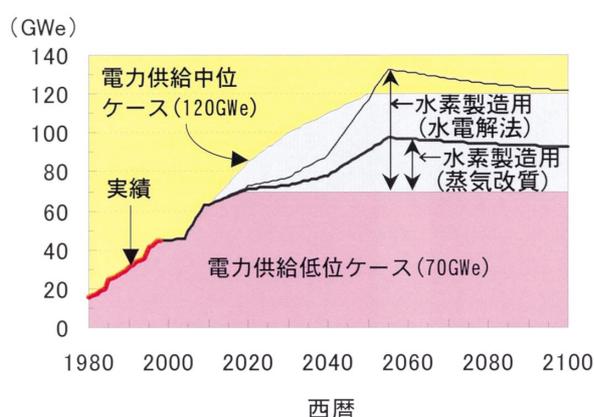


図12(b) 原子力設備容量

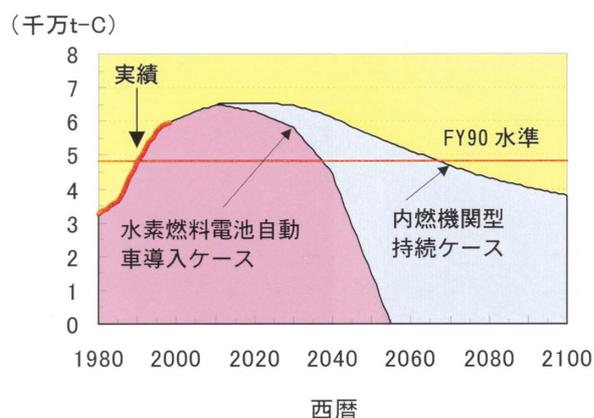


図12(c) 運輸部門における自動車のCO₂排出量

それらの値と目標値に対する満足度の関係を図数形とした「効用関数」を定義した。その後、実際に設計データを用いて、いくつかの候補サイクルシステム概念の「目標達成度評価」を試みた。開発目標の達成の見通しが乏しい技術を予め評価対象から外したこともあり、各概念ともおおむね良好な結果が得られている。

さらに、百年以上にわたる長期的なサイクル諸量解析を行うとともに、FBRが21世紀社会にいかに関与されていくかといった観点から、最近、燃料電池用に着目されている「水素製造にFBRを利用するシナリオ」を検討した。その結果、将来の燃料電池自動車用水素をFBRからの電気による電気分解で賄った場合、現有発電設備に匹敵する設備量の導入が想定されることが分かった。

参考文献

- 1) 田村坦之, 他: “効用分析の数理と応用”, コロナ社 (1997)。
- 2) 資源エネルギー庁総合エネルギー調査会新エネルギー部会: “新エネルギーの潜在性と経済性”, 第1回会合資料 (平成12年1月)。
- 3) “Uranium '99”, OECD/NEA, IAEA (1999)。
- 4) Evaluation of the Impact and Inter Generation Risk Transfers Related to Release and Disposal of Radioactive Waste from the Nuclear Fuel Cycle: A Methodological Exercise, P. Crouail, 2000, IRPA 10.
- 5) 原子力委員会編: “原子力白書 平成10年度版”, 大蔵省造幣局, p.188 (1998)
- 6) “THE ECONOMICS OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE”, OECD/NEA (1994)
- 7) 財団法人日本電気協会: 電気新聞, 平成12年4月3日 (月曜日), 第24114号。
- 8) サイクル機構: “FBR導入シナリオの検討”, JNC TN9400 2001 036 (2000)
- 9) 資源エネルギー庁: “燃料電池実用化戦略研究会 (第4回) 議事要旨” (平成12年4月18日開催)
- 10) 日本エネルギー経済研究所: “エネルギー経済 2000年秋季号”, 第26巻, 第6号, p.1~23 (2000)
- 11) J.R.Hufton, S.Mayorga, and S.Sircar: “ Sorption Enhanced Reaction Process for Hydrogen Production ”, AIChE Journal, Vol.45, No.2, p248 ~ 256 (1999.2)
- 12) J.Hufton, W.Waldron, S.Weigel and et al.: “ Sorption Enhanced Reaction Process (SERP) for the Production of Hydrogen ”, Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-28890 (2000)
- 13) 日刊工業新聞, 平成12年11月22日。
- 14) 国立社会保障・人口問題研究所: “日本の将来人口推計 (平成9年1月推計) (1997)
- 15) 森田裕二, 杉山淳: “燃料電池自動車の開発・普及とインパクト” エネルギー経済, 第26巻, 第6号, p1~23 (2000年秋季)
- 16) 蓮池宏: “クリーンエネルギー自動車レポート (第7報)”, 季報エネルギー総合工学, 第23巻, 第2号, p.89~99 (2000)
- 17) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編: “エネルギー・経済統計要覧2000年度版”, p.36, (2000)
- 18) 経済産業省: “エネルギー生産・需給統計年報” (2000)