



FBR サイクル導入シナリオの検討 (Ⅲ)

— 水素利用社会を想定したハードパスとソフトパスの新たな協調概念 —

(研究報告)



2002年6月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

FBR サイクル導入シナリオの検討(Ⅲ)

－水素利用社会を想定したハードパスとソフトパスの新たな協調概念－ (研究報告)

大滝明¹⁾、小野清¹⁾、小澤正基²⁾、平尾和則¹⁾

要 旨

本報告書は、FBR サイクル実用化戦略調査研究における FBR サイクル導入シナリオ構築の一環として実施した、水素利用社会におけるハードパスとソフトパスとの新たな協調概念の検討結果について報告するものである。

本研究では、環境保全政策と水素利用を 21 世紀の潮流として捉え、将来の水素利用社会を想定した資源とエネルギーフローの概念、核燃料サイクルとソフトパス(分散電源、燃料電池自動車、化学プラント等)との協調概念をそれぞれ検討した。また、核燃料サイクルの貢献が期待される分野として、原子力による CO₂フリーエネルギー(電力、水素等)の生産に加え、水素利用の普及に伴って需要増加が予想される白金族系元素を使用済み燃料の再処理廃液から回収するシナリオを提案し、その需給ポテンシャルについて試算した。さらに、代表的な回収元素の放射能特性の評価、利用促進課題の抽出を行った。

今後は、環境に配慮した資源とエネルギーの供給システムを提案するために、回収元素については FBR サイクルを含めた供給ポテンシャルや経済性を評価する。また、エネルギー供給については、電力と水素の需給を通じて、火力や原子力のような大規模設備とコージェネレーション等の分散型設備が協調的に機能するシステム概念を具体化し、それに必要なインフラストラクチャー概念の検討を行う予定である。

1) 大洗工学センター システム技術開発部 FBR サイクル解析グループ
2) 大洗工学センター システム技術開発部 分離変換工学グループ
高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズ 2 WBS No.151110

Study on the FBR Cycle Introduction Scenario III
A New Harmonized Concept of Hard Energy Path and Soft Energy Path
in the Future Hydrogen Society

Akira Ohtaki*, Kiyoshi Ono*, Masaki Ozawa**, Kazunori Hirao*

Abstract

This report provides the results of our investigation about the new harmonized concept of hard energy path and soft energy path in the future hydrogen society, as a part of FBR cycle introduction scenario study in the JNC's "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System".

First, we considered that an environmental preservation policy and hydrogen utilization might be the current in the 21st century, then, investigated the supply-and-demand status of resources and energy in hydrogen society. Furthermore, the harmonized image of a nuclear fuel cycle and soft energy paths (distributed power supplies, fuel cell vehicle, chemical plant, etc.) was investigated.

Nuclear fuel cycle is considered to contribute to the supply of the platinum group metals whose the increase in demand will be expected in hydrogen society in addition to production of the CO₂ free energies (electric power, hydrogen, etc.) by nuclear energy. And the range of the supply-and-demand balance of the platinum group metals recovered from the reprocessed waste was calculated. Furthermore, its radioactivity characteristics and the problem on the utilization of the recovered elements was evaluated.

In order to propose the supply system of the resource and energy preserving the environment. We are going to study the infrastructure for the supply of recovered elements and CO₂ free energy.

* FBR Cycle Analysis Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

** Partition and Transmutation Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System (Phase 2) WBS No.151110

目次

1. はじめに	1
2. 地球環境問題と水素利用に関する最近の動向	2
2.1 環境保全に関する国内政策と事業活動	2
2.2 水素利用社会の息吹	3
3. 水素利用社会を想定したハードパスとソフトパスの新たな協調概念	4
3.1 エネルギーシステムへの考え方に対する多様化	4
3.2 核燃料サイクルとソフトパスの協調概念	4
4. 水素製造 FBR の物質流量に関する検討例	8
4.1 検討の概要	8
4.2 水素製造エネルギーの試算	8
4.2.1 低温水蒸気改質法の水素製造エネルギー	8
4.2.2 水電気分解法の水素製造エネルギー	11
4.3 水素製造エネルギーの試算結果と公表データとの比較評価	11
4.3.1 低温水蒸気改質法の評価	11
4.3.2 水電気分解法の評価	12
4.4 単位設備容量当りの物質流量の検討	13
4.4.1 系統放熱と所内負荷に関する想定条件	13
4.4.2 単位設備容量当りの水素製造量	16
4.4.3 単位設備容量当りの物質流量	17
4.5 水素製造 FBR の熱収支	19
4.6 水素製造 FBR の導入規模	21
4.6.1 代表計算ケース	21
4.6.2 時系列計算	21
4.7 水素製造 FBR の付加価値と付帯費用	23
4.8 物質流量に関する検討結果のまとめ	24
5. 回収希少元素の需給ポテンシャル	26
5.1 回収パラジウムの需給試算	26
5.1.1 パラジウムの需給状況と将来ニーズ	26
5.1.2 水素分離膜としてのパラジウム需給量の試算	26
5.2 回収ルテニウムの需給試算	29
5.2.1 ルテニウムの需給状況と将来ニーズ	29
5.2.2 アンモニア合成用触媒としてのルテニウム需給量の試算	30
6. 回収希少元素の比放射能	34
7. まとめ	35
8. おわりに	36
参考文献	37

目 次

図 3.1 水素利用社会における資源・エネルギーフローの概念図	5
図 3.2 核燃料サイクルとソフトパスの協調概念	6
図 4.1 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の物質フロー図	18
図 4.2 水電気分解型水素製造 FBR の物質フロー図	19
図 4.3 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の熱収支	20
図 4.4 水電気分解型水素製造 FBR の熱収支	20
図 4.5 運輸部門における水素消費見通し	21
図 4.6 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の設備容量	22
図 4.7 水電気分解型水素製造 FBR の設備容量	22
図 5.1 運輸部門における水素燃料電池自動車の水素消費見通し(基準ケース)	27
図 5.2 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の設備容量(電力設備等価換算)	27
図 5.3 Pd の累積需要量と回収 Pd の累積量の試算結果	29
図 5.4 回収 Ru 量とアンモニア合成用 Ru 系触媒の供給規模の試算結果	33
図 6.1 希少元素 FP の比放射能の経時特性	34

表 目 次

表 4.1 系統放熱および所内負荷の想定条件	16
表 5.1 軽水炉再処理の想定条件	28
表 5.2 Ru/HSAG 触媒の一例	31

1. はじめに

本報告書は、FBR サイクル実用化戦略調査研究における FBR サイクル導入シナリオ構築の一環として行った、水素利用社会におけるハードパスとソフトパスとの新たな協調概念の検討結果について報告するものである。

本研究では、環境保全政策と水素利用を 21 世紀の潮流として捉え、将来の水素利用社会を想定した資源とエネルギーフローの概念、核燃料サイクルとソフトエネルギーパス（分散電源、燃料電池自動車、化学プラント等）との協調概念をそれぞれ検討した。また、核燃料サイクルの貢献が期待される分野として、原子力による CO₂ フリーエネルギー（電力、水素等）の生産に加え、水素利用の普及に伴って需要増加が予想される白金族系元素を、使用済み燃料の再処理廃液から回収するシナリオを提案し、その需給ポテンシャルについて試算した。

本報告書の第 2 章では、今世紀の資源・エネルギー需給構造に変化をもたらすと考えられる環境保全政策と水素利用の動向を概括する。第 3 章では、将来のエネルギーシステムの在り方に対する代表的な見解と、水素利用社会を想定した資源とエネルギーフローの概念、核燃料サイクルとソフトエネルギーパスとの協調概念について述べる。また、第 4 章では水素製造 FBR の物質流量と国内導入規模の検討例を示すと共に、第 5 章では、使用済み燃料の再処理廃液から回収される白金族系元素の需給ポテンシャルの試算結果を紹介する。さらに、第 6 章では回収元素の比放射能の経時変化ならびに利用促進に向けた課題をまとめた。

2. 地球環境問題と水素利用に関する最近の動向

現在グローバルな対応が求められている環境問題の原因は、人類活動が自然環境の浄化能力や資源の再生産能力を上回る規模と速さで拡大したためとされている。ここでは、国内における環境保全への取り組みと、環境保全・資源保護の観点より次世代のエネルギーキャリアとして注目されている水素について概括する。

2.1 環境保全に関する国内政策と事業活動

1980年代後半から国際的にクローズアップされた環境問題に対応するため、わが国では「地球環境保全」の新規概念を取り入れ、環境政策と外交政策の調和を図った環境基本法が1993年11月に国会で成立した。引き続き、同法律に基く環境基本計画が1994年と2000年の二度に渡り閣議決定された。

2000年12月22日に閣議決定した第二次環境基本計画では、21世紀を環境世紀と位置付け、環境制約の下で資源やエネルギーの効率的利用を図りながら、これまでの大量生産・大量消費・大量廃棄型の生活様式や事業活動を見直す必要があると提案している。また、環境政策の方向性と展開については、自然環境と共生する持続可能な循環型社会経済システムの構築を目標に掲げ、11の重点分野について戦略的プログラムを提示している。この戦略的プログラムは三つのカテゴリー（環境問題、政策手段、横断的取組）から成り、最も広範多岐に渡る環境問題に関しては、以下の6分野毎に施策の基本的方向性が示されている^[1]。

- ① 地球温暖化対策の推進
- ② 物質循環の確保と循環型社会の形成に向けた取り組み
- ③ 環境負荷の少ない交通に向けた対策
- ④ 環境保全上健全な水循環の確保に向けた取り組み
- ⑤ 化学物質対策の推進
- ⑥ 生物多様性の保全のための取り組み

なお、政策手段については「環境教育」、「環境配慮」および「環境投資」の3分野、横断的な取り組みについては「地域づくり」と「国際的寄与」の二つの分野がそれぞれ選定されている。

この様な環境政策と連動し、国内では産業部門を中心に事業体の自主的な環境保全活動が活発化している。例えば日本経団連による環境自主行動計画(1996年策定)については、主要産業の77%が参加し、業界ごとのCO₂削減実績を毎年フォローアップしている^[2]。また、環境管理システム(ISO14000s)の登録件数は、日本規格協会・環境管理規格審議委員会事務局調べによると2002年2月末現在で8,444件

とされ、産業部門のみならずサービス部門等でも登録件数が毎年増加している。一方、日常生活に関連するところでは、環境配慮・省エネルギー型商品に対して認定されるグリーン商品の登録数で見た場合、その数はグリーン購入ネットワークによると文具・事務用品、OA 機器、自動車を中心に食料品や雑貨を含め 8,220 商品(2002 年 3 月末現在)に渡る。今日の環境保全活動は事業体の自主性に委ねられているが、産業部門のみならず運輸、民生、エネルギー事業等の社会活動全般で環境負荷低減対策が求められており、とりわけ温室効果ガスの大量発生源とされる自動車や発電設備については、エネルギー利用効率の向上ならびに燃料転換等の技術対応が期待されている[1], [3]- [5]。

2.2 水素利用社会の息吹

自動車産業が次世代の流体燃料として注目している水素は、移動用燃料電池のみならず民生用のコージェネレーションでも利用が見込まれており、その普及の鍵は水素供給インフラストラクチャーの整備が握るとされている[6], [7]。水素をエネルギーキャリアとして利用するための研究・開発は、国内では第一次エネルギー危機直後の 1974 年に現・横浜国立大学名誉教授の太田時男氏等の提案によりサンシャイン計画の柱の一つとして着手され[8]、現在は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が実施するフェローシップ事業の一環として、水素利用国際クリーンエネルギーシステム開発 (WE-NET: World Energy Network) が進められている。WE-NET が注力している水素供給インフラストラクチャーは、水力や太陽、風力等の再生可能エネルギーを利用したシステムである。一方、わが国における水素エネルギー利用の提唱者の一人である太田氏は、クリーン・エネルギーの源は太陽エネルギーと核エネルギー (原子力) に制限されるとし、この太陽エネルギーと原子力から電力と水素を生産するクリーン・エネルギー・システムを提案している[9], [10]。また、最近では原子力システム研究懇話会の堀氏が長期的なグローバルエネルギー供給の観点より原子力水素生産を提唱している[11], [12]。このような水素利用を巡る動きは国内のみならず、アイスランドにおける「水素社会」を目指した長期政策の発表 (1999 年) や、2000 年 10 月に仏国で開催された OECD/NEA による原子力水素製造に関する情報交換会合をはじめ、2001 年 11 月の米国原子力学会冬季大会では原子力水素生産に関する講演が企画されるなど世界的規模で活発化の兆しを見せており、水素利用は今後も環境とエネルギー資源の観点から関心を集めていくものと思われる[13], [14]。

3. 水素利用社会におけるハードパスとソフトパスの新たな協調概念

3.1 エネルギーシステムの考え方に対する多様化

前記 2.2 節で既述した WE-NET の検討は、分散型の自然エネルギーを貯蔵や輸送が容易な水素等のエネルギーキャリアに転換し、現在のエネルギー流通と同様に世界的規模のネットワークで需給しようとする取り組みである。同様に自然エネルギーを最大限活用した社会形成の提案が、非営利団体「ロッキーマウンテン研究所」(RMI) の副所長を務める Amory B. Lovins によりなされている。Amory B. Lovins は、自著の「ソフト・エネルギー・パス」の中で、火力や原子力等の大規模集中型システムをハード・エネルギー・パス（以後、ハードパスという）と称し、水力や太陽光、風力等の自然エネルギーを利用した分散型システムをソフト・エネルギー・パス（以後、ソフトパスという）と呼び、環境負荷を抑制し、人類の平等性や価値観を見直すための方策として、省エネルギーを基調とするソフトパスへの転換を提言している^[15]。Amory B. Lovins はソフトパスとハードパスを二律背反の関係として位置付けているが、慶応義塾大学大学院の茅教授らは、コージェネレーションや太陽光発電等の分散型設備と、火力や原子力のような大規模設備を協調的に機能させるホロニック・パスを提唱している。このホロニック・パスは、大型設備の安定性と中小規模設備がもつ柔軟性（建設期間の短縮、規模調節の融通）を組み合わせ、供給規模に対するフレキシビリティや、さまざまなシステム間でコスト競争力を高め合うことにより、経済性をはじめエネルギーシステム全体の協調性と効率の向上が図られるとしている^[16]。

将来のエネルギーシステムの在り方については、1)ソフトパスに重点を置く考え方や、2)ソフトパスとハードパスを相互補完的に機能させる考え方など多様化している。また、エネルギーキャリアとしての水素利用への期待など、新たな局面を迎えようとしている。その様な中で上記 2) の考え方にに基づき、ハードパスに位置付けられる原子力を、電力や水素に代表される CO₂ フリーエネルギーの安定供給と共に、ソフトパスでは成し得ない付加価値を創出するシーズとして、原子力利用の可能性を幅広く社会に提案していくことも必要と考えられる。そこで、原子力利用の付加価値ならびにシーズとしての可能性について、次節以降で述べることとする。

3.2 核燃料サイクルとソフトパスの協調概念

ここでは、一次エネルギーとして代表的な自然エネルギー、化石エネルギーおよび原子力の特徴を概括すると共に、将来の水素利用社会をイメージ化した場合に想定される、それぞれの位置付けと協調概念について述べる。

(1) 水素利用を基軸とした循環型社会のイメージ

自然エネルギーは出力密度が小さいものの、環境面での立地制約が少ない特長

をもつ。化石燃料は貯蔵や運搬が容易なことから様々な熱機関や動力機関で利用されているが、煤塵や温室効果ガスの放出等の環境影響および化石資源の偏在性と有限性を考慮する必要がある。原子力は出力密度が高く、FBR サイクルでは軽水炉燃料の濃縮工程で発生するテイルウランや使用済み燃料のリサイクル利用が可能なることから、核燃料資源の国内需給を通してエネルギーセキュリティの向上と一次エネルギーの一部について持続的供給が期待できる。また、放射性物質を取り扱う原子力施設は環境や公衆に対する潜在的リスクを内包しており、放射線や放射性物質の影響を顕在化させないための安全管理や予防保全が開発当初から導入されている。これらの一次エネルギーの特徴を踏まえ、将来の水素利用社会で想定される資源とエネルギーの循環フローを図 3.1 に示す。

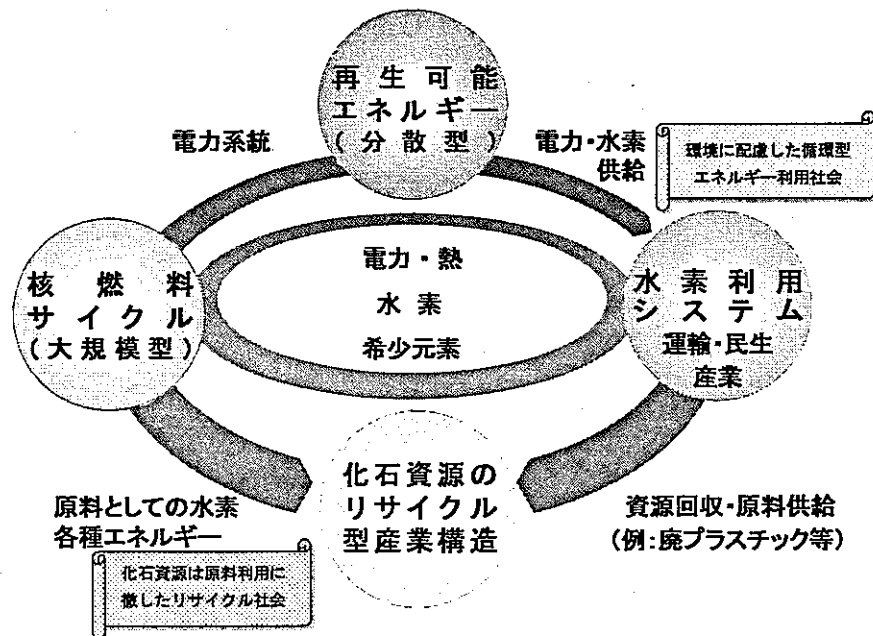


図 3.1 水素利用社会における資源・エネルギーフローの概念図

図 3.1 では、化石燃料に代わって水素が流体燃料の主役を担うものとし、化石資源は主に産業部門で工業用原料としてリサイクル利用が行われる。また、再生可能（自然）エネルギーを利用した分散型システムの国内供給規模は、原油換算で約 2,000 万 kl~3,900 万 kl が物理的限界潜在量とされている^[17]。これは 2000 年度の国内一次エネルギー供給量の 3%~7%程度にとどまることから、再生可能エネルギーは地域に密着したエネルギー生産（電力供給、水素製造）としての活用が見込まれる。大規模システムに位置付けられる原子力は、基幹電源としての電力供給はもとより、将来普及が予想される水素自動車（燃料電池方式、水素デ

イーゼル方式等)、および燃料電池や水素ガスタービンを用いたコージェネレーション等への水素供給、再生可能エネルギーを利用した分散型システムのバックアップ機能等、エネルギー利用面で幅広い貢献が期待される。また、水素はアンモニア合成の原料ガスや合成樹脂の添加剤等に利用されており、この他に製鉄産業等で還元剤としての利用が考えられるため、原子力は水素供給を通じて産業部門との関係も見込まれる。さらに、核燃料サイクルの使用済み燃料の再処理廃液中には、パラジウム (Pd) やルテニウム (Ru) 等の白金族系希少元素が含まれており、資源として貴重なこれらの元素は触媒や電極材料等への利用が考えられるため、原子力利用ではエネルギー資源と金属資源の同時生産というユニークな付加価値が期待できる[18], [19]。

(2) 核燃料サイクルの社会的付加価値

前記 3.2 (1)項では、核燃料サイクルはエネルギー資源と金属資源の同時生産というユニークな付加価値を持つと述べた。この付加価値は水素利用社会を動かす歯車の一つとして機能すると考えられ、図 3.2 に示すような協調概念 (シナリオ) を描くことができる。図 3.2 では核燃料サイクルをハードパスとして位置付け、一方のソフトパスは水素を燃料に用いる分散型電源や燃料電池自動車の他に、水素あるいは希少元素を原料や触媒として利用する化学プラント等を含め広義的に位置付けている。ハードパスの原子炉側では電力や水素といった CO₂フリーエネルギーを生産し、一方の再処理側では、主に南アフリカ共和国やロシアからの輸入に依存している白金族系元素の国内生産を図る。

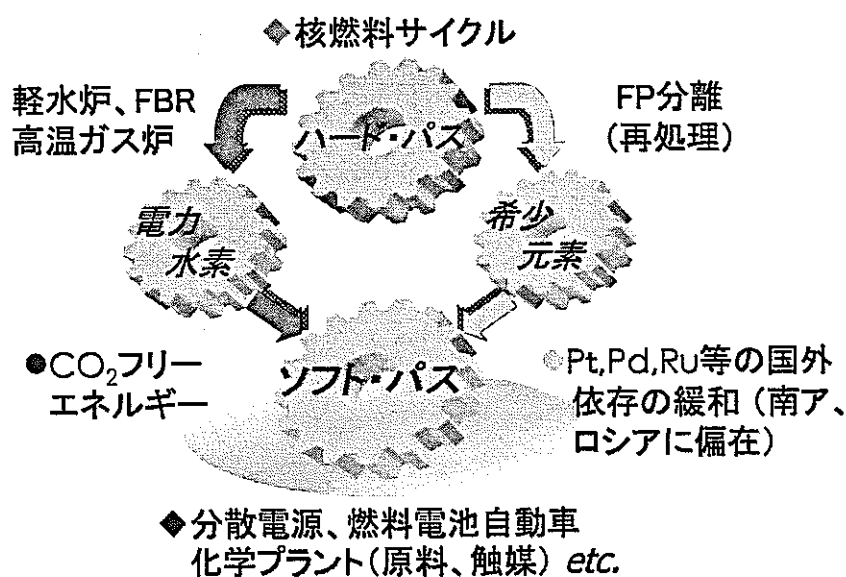


図 3.2 核燃料サイクルとソフトパスの協調概念

白金族系元素は耐蝕性や電導性、水素の透過・吸収性に優れているため自動車用触媒、電子回路あるいは水素分離に利用されており、水素利用が本格化した場合には水素貯蔵合金や化学触媒、燃料電池の電極として需要増加が予想される。しかしながら白金族系元素は、産出地が南アフリカ共和国、ロシアおよび北米に偏っており、埋蔵量や生産量が少なく市場価格も不安定なために、国内では使用済みの触媒や電子基板等からの回収利用が進められている。ちなみに Pd と Ru の地球埋蔵量は、それぞれ 2 万トン、0.5 万トンと推定され、人類が古代から利用してきた銅の地球埋蔵量の約 5 億トンと比べるとはるかに少ない^[20]。また、Pd の例で国内市場価格の動きを見ると、1990 年から 1996 年末までは約 500 円/g で推移していたが、1997 年初旬から徐々に上昇し 1999 年末には約 1,500 円/g となり、その後 2001 年には約 4,000 円/g まで高騰した後、2002 年 6 月時点では 1,500 円/g 前後で推移しているが先行きが不透明な状況にある。

なお、使用済み燃料の再処理廃液から回収される白金族系元素を産業用資源として利用できれば海外依存率の抑制に繋がるが、回収元素は放射性であるため、利用に当っては放射能の減衰待ち貯蔵や用途の制限等が想定される。Pd と Ru に着目した各回収元素の需給量、および比放射能の経時変化に関する試算結果を、次章以降で述べる。

4. 水素製造 FBR の物質流量に関する検討例

前章では、CO₂フリーエネルギー（電力、水素等）の生産および希少元素の供給による核燃料サイクルとソフトパスとの協調概念を紹介した。本章では、ナトリウム冷却型 FBR を想定した場合の水素製造エネルギー、単位設備容量当りの給水や生成水素等の物質流量、燃料電池自動車の水素消費見通しに基づく水素製造 FBR の導入規模等の検討例について述べる。

4.1 検討の概要

現在の水素製造法の主流は、ナフサやメタン等の炭化物系燃料と水蒸気を約 700°C～1,000°C の高温条件で触媒反応させて水素を製造する水蒸気改質法と、水の電気分解から水素を得る水電気分解法（以後、水電解法という）に大別される。

また、従来の水蒸気改質法よりも低温条件（FBR 運転温度相当の 550°C 前後）で水素を製造し、副次的に発生する CO₂ を効率的に回収可能な新しい改質法が米国のエアプロダクト社^{[20],[21]}や、東京ガス（株）と三菱重工（株）^{[22],[23]} で開発されている。特に東京ガスと三菱重工が開発したパラジウム膜水素分離型改質器（メンブレンリアクタ）は FBR の水素製造候補技術として期待され、新型炉技術開発（株）ではメンブレンリアクタを採用したナトリウム冷却型 FR（FR-MR:Fast Reactor-Membrane Reformer）^[24] の概念検討が行われ、核燃料サイクル開発機構でも低温水蒸気改質型水素製造 FBR として導入シナリオの検討^{[25]-[27]}を行っている。

本報の検討では、メンブレンリアクタを採用した低温水蒸気改質型水素製造 FBR と、水の電気分解法を採用した水電解型水素製造 FBR を想定し、それぞれの方式による①水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー量、②製造エネルギーの試算結果と公表データとの比較、③系統放熱や各種所内負荷を考慮に入れた水素製造 FBR 単基（2,500MWe、送電端効率 40% の発電プラント相当）当りの物質流量、④熱収支を把握する目的で行った。また、これらの検討結果を基に、燃料電池自動車用の水素を全て FBR で生産すると仮定した場合の水素製造 FBR 規模を計算し、併せて副生成ガスの付加価値と原料ガス等の付帯費用を概算した。

なお、パラジウム膜を用いたメンブレンリアクタの機能的特徴については、次章の 5.1 節「回収パラジウムの需給計算」で述べることとする。

4.2 水素製造エネルギーの試算

4.2.1 低温水蒸気改質法の水素製造エネルギー

(1) 水蒸気-メタン改質反応式

水蒸気改質によりメタンガスから水素ガスを生成する反応式は、米国エアプロダクト社や、東京ガスと三菱重工の文献^{[20]～[23]}によると次の通りとされている。

水蒸気-メタン改質 (SMR: Stream Methane Reformation) 反応は、

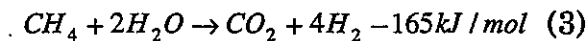
$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 - 206kJ/mol \quad (1)$$

の吸熱反応として表記され、さらに未反応のメタンガス(CH₄)や一酸化炭素 (CO) を含む湿性ガスは、水蒸気との湿性ガス転化 (WGS: Wet Gas Shift) 反応により、

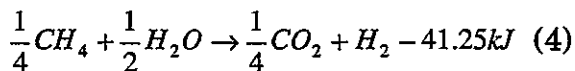
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + 41kJ/mol \quad (2)$$

と表されるように、発熱を伴って二酸化炭素と水素ガスに転化する。

また、上述の(1)式と(2)式の反応は、次式のように表記される。



さらに、(3)式を水素ガス(H₂)1mol 当りで記述すると次の(4)式のようにになる。



なお、(1)式ならびに(3)式の吸熱量はメタンガス(CH₄) 1 mol 当り、(2)式の発熱量は一酸化炭素(CO) 1 mol 当り、(4)式の吸熱量は水素ガス(H₂) 1 mol 当りの反応熱である。

(2) 低温水蒸気改質法の試算条件

前出の反応熱は、熱化学平衡状態で分子結合の組み換えに必要なエネルギー量を表している。一方、工学的視点から水素ガス 1kg 当りの製造エネルギーを算出する場合、熱化学平衡反応熱の他に、メタンガスや水蒸気等の原料を改質温度まで高めるための顕熱や潜熱、改質設備の熱効率等を考慮する必要がある。低温水蒸気改質法の水素製造エネルギーは、以下の想定条件に基づいて試算した。

なお、水素製造 FBR の水素製造量を求める場合は、原子炉冷却系設備の他にメタンガス受入貯蔵設備、水素ガス貯蔵設備、大型脱塩装置で構成される給水処理設備、CO₂回収処理設備等の所内負荷を別途考慮する。

- ① 水蒸気とメタンガスのスチームカーボン比 SC は、東京ガスや三菱重工の実験条件に基づき mol 比 (体積比) にて 3.3 : 1 と仮定する。
- ② 入熱量は吸熱反応熱量 $\Delta h_H = 41.25kJ$ の他に、メタンガスの顕熱量 Q_M と水の蒸発潜熱量 Q_W を考慮する。
- ③ メタンガス転化率 CR は、東京ガスや三菱重工の知見を基に 60% とする。
- ④ 放熱ロスを含んだ改質設備の熱効率 E は 70% を仮定する。

(3) 低温水蒸気改質法水素製造エネルギー

(i) 水素ガス 1mol 当りの原料ガスへの入熱量 Q'

ここでは、水素ガス 1mol ($\equiv 2$ g) を基底量として、メタンガスと水蒸気から成る原料ガスへの入熱量を概算する。

①メタンガスの顕熱量 Q_M

平衡状態では、1mol の水素ガスを生成するためには 1/4mol ($\equiv 4$ g) のメタンガスが必要である。ここでは、このメタンガス 1/4mol の昇温に要す顕熱量 Q_M を、貯槽温度と改質温度をそれぞれ 288K、773K と仮定して求める。メタンガス 1/4mol 当りの顕熱量 Q_M は、メタンガス平均温度約 530K の定圧比熱容量 $C_{p,M}=48.5\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ と、さらにメタンガス貯蔵設備と改質設備における流体温度差 $\Delta T_M=485\text{K}$ を次の(5)式に与えて約 6kJ と計算される。

$$Q_M = \frac{1}{4} \times C_{p,M} \times \Delta T_M = \frac{48.5 \times 485}{4} = 5881(\text{J}) \quad \therefore 6(\text{kJ}) \quad (5)$$

②水の蒸発潜熱量 Q_w

ここでは、スチームカーボン比 $SC=3.3$ における水の蒸発潜熱量 Q_w を求める。スチームカーボン比 SC はメタンガス 1mol に対する水蒸気の体積比である。前記①で記述した通り、平衡状態では水素ガス 1mol ($\equiv 2$ g) の生成に要すメタンガスは 1/4mol であることから、スチームカーボン比 SC を考慮した水蒸気の供給量 m_w はメタンガスの 3.3 倍、即ち 0.825 mol ($\equiv 14.9$ g) となる。また、水の蒸発潜熱量 Q_w は、圧力 0.6MPa の水(at.288K)と過熱蒸気(at.773K)のエンタルピー差 $\Delta h_w=3420\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ より次の通り計算される。

$$Q_w = m_w \times \Delta h_M = 14.9 \times 3420 = 50958(\text{J}) \quad \therefore 51(\text{kJ}) \quad (6)$$

(ii) 原料ガス入熱量 Q' の近似

前項の①、②で求めたメタンガス顕熱量 Q_M と水の蒸発潜熱量 Q_w は、メタンガスが全て水素と CO_2 に転化した理想状態での入熱量である。実際のメタン転化率 CR は、東京ガスや三菱重工の知見によると概ね 60% と考えられる。オフガス中にはメタンガスや水蒸気等の未利用ガスが残っているため、これらはオフガス中から回収した後に再び加熱を行いリサイクルされるものと仮定する。このリサイクル工程を考慮した水素ガス 1mol 当りの原料ガス入熱量 Q' は、便宜的にメタンガス転化率 $CR=60\%$ を用いて(7)式の通り保守的に近似する。

$$Q' = \frac{(Q_M + Q_w)}{CR} = \frac{(6 + 51)}{0.6} = 95(\text{kJ}) \quad (7)$$

(iii) 水素ガス 1kg の製造エネルギーと総エネルギー量

ここでは、水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー Q_H 、ならびに原料用メタンガスの燃焼エネルギーを考慮した総エネルギー量について述べる。

水素製造エネルギー Q_H は、メタン改質における反応熱量 $\Delta h_H=41.25\text{kJ/mol}$ と、前記(2)項で補償した原料ガスへの入熱量 $Q'=95\text{kJ/mol}$ 、水素 1mol 当りの重量 $m_H=0.002\text{kg/mol}$ 、および改質設備の熱効率 $E=70\%$ の仮定より次式にて約 27kWh/kg と計算される。

$$Q_H = \frac{(\Delta h_H + Q')}{m_H \times E} = \frac{(41.25 + 95)}{0.002 \times 0.7} = 97321(\text{kJ / kg}) \quad \therefore 27\text{kWh / kg} \quad (8)$$

また、総エネルギー量は製造エネルギー量 Q_H と原料用メタンガスの燃焼エネルギーとの和で表される。水素ガス 1kg (500mol) の製造に要す原料用メタンガス重量は、(4)式の mol 比より $500\text{mol} \times 1/4 \text{ mol} \times 0.016\text{kg} \doteq 2\text{kg/kgH}_2$ となる。さらに、原料用メタンガスの燃焼エネルギー量は真発熱量ベースで約 $13.8\text{kWh/kg} \times 2\text{kg/kgH}_2 \doteq 28\text{kWh/kg}$ と計算され、総エネルギー量は製造エネルギー量 Q_H = 約 27kWh/kg と原料用メタンガスの燃焼エネルギー約 28kWh/kg との和から約 55kWh/kg になる。

4.2.2 水電気分解法の水素製造エネルギー

ここでは、水電解法による水素ガス 1kg 当りの製造エネルギーの概算方法と試算結果を述べる。水電解法の製造エネルギー Q_E は、水素ガス 1kg 当りの発熱量 h_H (真発熱量ベースで約 33kWh/kg) を基に、発電効率 $E_e(=40\%)$ 、電解効率 $E' (=90\%)$ を仮定し、(9)式にて計算した。その結果、水電解法による水素ガス 1kg 当りの製造エネルギーは約 92kWh/kg と試算された。

$$Q_E = \frac{h_H}{E_e \times E'} = \frac{33.22}{0.4 \times 0.9} = 92.28(\text{kWh / kg}) \quad (9)$$

4.3 水素製造エネルギーの試算結果と公表データとの比較評価

前記 4.2 節で算出した低温水蒸気改質法ならびに水電解法の各水素製造エネルギーの妥当性を確認するため、IAEA(International Atomic Energy Agency)ならびに電力中央研究所(以後、電中研という)の公表データと比較検討を行った^{[28], [29]}。

4.3.1 低温水蒸気改質法の評価

ここでは、IAEA および電中研が公表している水蒸気改質法の水素ガス製造エネルギーを比較対象として、低温水蒸気改質法の試算結果の妥当性を評価する。

(1) IAEA 報告書^[28]

IAEA が公表しているメタン蒸気改質による水素製造エネルギー量を、水素ガス密度 $\rho = 0.0899 \text{ kg/m}^3$ で単位重量当りに換算すると理論値で 8.7 kWh/kg 、実効値では約 $22 \sim 28 \text{ kWh/kg}$ になる。前記の (8)式で算出した低温水蒸気改質法の製造エネルギー (約 27 kWh/kg) は、IAEA が公表している実効値の範囲内にあることから概ね妥当と考えられる。

(2) 電中研著書^[29]

参考文献^[29]に記載された水素発熱量と天然ガス改質における投入エネルギーを、水素ガス密度 ($\rho = 0.0899 \text{ kg/m}^3$) で単位重量当りに換算すると、それぞれ約 39 kWh/kg 、約 65 kWh/kg となる。また、水素製造効率の水素発熱量と投入エネルギーの比から 60% とされている。

参考文献^[29]の投入エネルギー (約 65 kWh/kg) は、原料ガスの燃焼エネルギーを含めた総エネルギー量 (前記 4.2.1(3)(iii)項で算出した約 55 kWh/kg に対応) と考えられる。仮に原料ガスの燃焼エネルギー量をメタンガスの真発熱量ベースで約 $13.8 \text{ kWh/kg} \times 2 \text{ kg/kgH}_2 \approx 28 \text{ kWh/kg}$ とした場合、熱源用としての製造エネルギーは約 65 kWh/kg と約 28 kWh/kg の差から約 37 kWh/kg と推定される。この推定値は、IAEA 公表値 (約 $22 \sim 28 \text{ kWh/kg}$) および低温水蒸気改質法の試算結果 (約 27 kWh/kg) とほぼ同レベルにあるといえる。

4.3.2 水電気分解法の評価

低温水蒸気改質法と同様に、IAEA と電中研が公表している水蒸気改質法の水素ガス製造エネルギーを比較対象として、水電解法の試算結果の妥当性を評価する。

(1) IAEA 報告書^[28]

IAEA 報告書では、水電解法の水素製造効率は、電気入力に対して $72\% \sim 80\%$ 、発電用一次エネルギーを基準に考えた効率は $20\% \sim 25\%$ とされている。水電解法の水素製造エネルギーについては、水素ガス密度 ($\rho = 0.0899 \text{ kg/m}^3$) で単位重量当りに換算した理論値は約 39.4 kWh/kg (総発熱量ベース)、同じく実効値は約 54.5 kWh/kg (同) とされている。また、計算の前提条件として、電源は発電効率 40% の化石燃料発電、発電用一次エネルギー量を基準にした効率は約 27% とされている。この前提条件を用いて、理論値および実効値に対する製造エネルギー (発電用一次エネルギーを基準) は、発電効率 40% を用いて、それぞれ 98.5 kWh/kg および約 136 kWh/kg と計算される。さらに、電気入力を基準にした水素製造効率は、理論値に対する実効値の割合から約 72% と推定される。

この IAEA 公表値に基づいて計算した製造エネルギーと、(9)式による試算結果

(約 92 kWh/kg) の差は、採用している水素発熱量 (参考文献[28]: 総発熱量、内部試算: 真発熱量) と電気入力を基準にした水素製造効率 (参考文献[28]: 約 72%、内部試算: 90%) の違いによって生じており、必然的な差として捉えることができる。

なお、発熱量の表記方法は、燃焼で生じる水分子の蒸発潜熱 (仕事量として利用できないエネルギー) を含めた総発熱量と、蒸発潜熱を含まない真発熱量の二種類があり、熱効率や熱収支の計算では一般的に真発熱量が使用されている。

(2) 電中研著書[29]

参考文献[29]によると水電解法による水素製造効率は約 90%とされ、同文献に記載されている水素発熱量と電力消費量を水素ガス密度 ($\rho = 0.0899 \text{ kg/m}^3$) で単位重量当りに換算すると、水素発熱量は約 39kWh/kg、電力消費量は約 44kWh/kg となる。IAEA 報告書の表記方法に倣うと理論値は約 39kWh/kg (水素発熱量)、実効値は約 44kWh/kg (電力消費量) と書き表すことができる。仮に発電効率 40%の電源を想定した場合の水素 1kg 当りの製造エネルギー (発電用一次エネルギー量を基準) は、実効値約 44kWh/kg を発電効率 40%で除して 110 kWh/kg となり、(9)式による試算結果 (約 92 kWh/kg) と概ね一致する。

ちなみに、水素発熱量に真発熱量 (約 33kWh/kg) を適用した場合の製造エネルギーは、真発熱量を水素製造効率 90%と発電効率 40%で除して約 92 kWh/kg となる。したがって、参考文献[29]に基づいて計算された製造エネルギー (約 110 kWh/kg) と(9)式の試算結果 (約 92 kWh/kg) との差は、採用した水素発熱量の違い (参考文献[29]: 総発熱量、内部試算: 真発熱量) によるものである。

4.4 単位設備容量当りの物質流量の検討

ここでは、水電気分解法と低温水蒸気改質法による水素ガス 1kg 当りの製造エネルギーの内部検討結果を基に、水素製造 FBR 単基 (2,500MWe、送電端効率 40%の発電プラント相当) 当りの物質流量を検討する。

4.4.1 系統放熱と所内負荷に関する想定条件

物質流量の設定に際しては、水素製造エネルギーの他に原子炉冷却系設備の系統放熱をはじめ、メタンガス受入貯蔵設備や水素ガス貯蔵設備、大型脱塩装置を含めた給水処理設備、CO₂回収処理設備等の所内負荷等を考慮する。これらの系統放熱や所内負荷については、次のように仮定する。

(1) 原子炉冷却系の系統放熱量

FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズ 1 では、原子炉冷却系の系統放熱量は未だ検討されていないため、過去に大滝が大型炉設計研究の一環として定量化した 600MWe 級 FBR の系統放熱量を適用する^[30]。この 600MWe 級 FBR (ナトリウム冷却型 MOX 燃料炉心、3 ループ) は、原子炉容器のコンパクト化や冷却系配管の大幅な短縮化など現在の FBR 設計のコンセプトを踏襲しており、このため配管部の放熱量が「もんじゅ」に比べ著しく軽減(「もんじゅ」約 1.5MW_t、大型炉約 0.6MW_t) されるため、系統全体の放熱量も約 3.2MW_t (「もんじゅ」約 3.8MW_t) に抑えられている。仮に 1,000MWe 規模の FBR の系統数が 3 ループから 4 ループに増え、それに伴って系統放熱量も約 1.3 倍に増加すると仮定した場合、系統全体の放熱量は 4.3MW_t 程度と見込まれるため、裕度を考慮して 5MW_t と想定する。

(2) 原子炉冷却系設備所内負荷

原子炉冷却系設備所内負荷は、FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズ 1 で検討されたナトリウム冷却大型 FBR の所内率を参考にして約 4% と仮定する。定格運転時の給水ポンプは蒸気を駆動源にしているため、この所内率 4% の内訳は原子炉冷却系の循環ポンプ、原子炉安全保護系の予熱、制御系や補機系の電力として消費されるものと考えられる。仮に発電効率 40%、発電端出力 1,000MWe 規模の FBR プラントを想定した場合の原子炉冷却系設備所内負荷は、電気出力で約 40MWe、熱出力で 100MW_T 程度と見積もられる。

(3) 給水処理設備負荷

前出の IAEA 報告書による水電解法の解説では、海水の脱塩処理で消費されるエネルギー量は、水 1m³ 当り 40~100kWh/ Nm³ あるいは水素ガスの発熱量の 1% 程度とされている^[28]。水電解法における給水量は、水素ガス 1Nm³ 当り 1 リットルが必要といわれており、水素ガスの密度 $\rho_H=0.0899\text{kg/m}^3$ 、水の密度 $\rho_w=999.1\text{kg/m}^3$ (at.288K, 0.1MPa) における水素ガス 1kg 当りの給水量は 11.1kg となる。また、メタン蒸気改質法においては、水素ガス 1mol 当り 0.825mol の水が必要とされるため、水素ガス 1kg 当りでは $500\text{mol.H}_2 \times 0.825\text{mol.H}_2\text{O} \times 0.018\text{kg/mol.H}_2\text{O}$ より約 7.4kg の給水量になる。給水脱塩処理はメタン蒸気改質法でも改質器の劣化防止のために施すことから、先の脱塩処理の消費エネルギーは、給水処理設備負荷として水電分解法と低温水蒸気改質法の双方で必要になる。なお、消費エネルギーは水 1m³ 当り 100kWh/ Nm³ (水 1kg 当り 0.1 kWh/kg) として、水素ガス 1kg 当りの給水処理設備負荷は水電解法の場合には 1.1 kWh/kg.H₂、低温水蒸気改質法の場合には 0.7 kWh/kg.H₂ と仮定する。

(4) メタンガス受入貯蔵設備負荷

ここでの対象範囲は、液化ガスの受入・貯蔵設備と海水の熱等を利用した気化装置を想定する。気化装置の熱源には一般的に海水が利用されるため、主な負荷としては海水を汲み上げるための取水ポンプや、液化ガスを気化装置まで配送する液送ポンプ、気化したガスを消費設備に配送するための圧縮機などがあげられる。これら動力源の消費エネルギーについては参考データが見出せなかったため、後述の水素ガス貯蔵設備負荷との合計で所内率 1%増加を仮定する。

(5) 水素ガス貯蔵設備負荷

水素ガス貯蔵設備の主な装置としては、水素ガスを冷却する熱交換器、水素ガスを貯槽に導くための圧縮機、貯蔵タンクならびに払出設備が想定される。これら動力源で消費される電力は、低温水蒸気改質法の場合にはメタンガス受入貯蔵設備負荷との合計で所内率の 1%増加を見込む。また、水電解法の場合には水素ガス貯蔵設備負荷として、所内率の 0.5%増加を仮定する。これらのガス系設備の所内負荷は、仮に発電効率 40%、発電端出力 1,000MWe 規模の FBR プラントを想定した場合、低温水蒸気改質法では消費電力 10MWe、熱出力換算で $25MW_T$ になり、水電解法では消費電力 5MWe、熱出力換算で $12.5MW_T$ となる。

なお、水素を液体貯蔵する場合には液化装置が必要になるが、液化装置の熱源としてはメタンガスの冷熱利用が想定されるため、ここでは所内負荷に含めない。

(6) CO₂ 回収処理設備負荷

エネルギー・資源ハンドブックによると、CO₂ 回収エネルギーは化学吸収法、膜分離法、PSA 法（圧カスイング吸着法）のいずれも約 $0.4kWh/Nm^3.CO_2$ とされており、CO₂ の液化処理を含めると火力発電量 $4.4kWh/Nm^3.CO_2$ の 2 割前後が消費されると見られている^[31]。この CO₂ 回収エネルギー Q_R と CO₂ 液化処理エネルギー Q_L を CO₂ 密度 $\rho_{CO_2}=1.977kg/m^3$ で水素ガス 1kg 当りに単位換算すると、CO₂ 回収エネルギー量 Q'_R は(10)式より約 $1.1kWh/kg$ と計算され、

$$Q'_R = \frac{500mol H_2 \times \frac{1}{4} mol / mol \times 0.044kg / mol CO_2}{\bar{n}_{CO_2}} \times Q_R \quad (10)$$

CO₂ 液化処理エネルギー量 Q'_L は(11)式より約 $2.4kWh/kg$ になる。

$$Q'_L = \frac{500mol H_2 \times \frac{1}{4} mol / mol \times 0.044kg / mol CO_2}{\bar{n}_{CO_2}} \times 0.2 \times Q_L \quad (11)$$

(7) 想定条件のまとめ

前記(1)項～(6)項で仮定した系統放熱ならびに所内負荷の想定条件を表 4.1 に示す。

表 4.1 系統放熱および所内負荷の想定条件 (例：原子炉出力 2,500MWt)

項目		水電解法	低温水蒸気改質法
原子炉冷却系系統放熱量 (MW _t)	Q1	5	5
原子炉冷却系設備所内負荷 (MW _t)	Q2	100	100
給水処理設備所内負荷 (kWh/kgH ₂)	Q3	1.1	0.7
メタンガス受入貯蔵設備所内負荷 (MW _t)	Q4	0	25
水素ガス貯蔵設備所内負荷 (MW _t)	Q5	12.5	上記値の内数
CO ₂ 回収液化処理設備所内負荷 (kWh/kgH ₂) (CO ₂ 回収処理のみの場合)	Q6	0.0 (0.0)	2.4 (1.1)
水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー	Q _H	92 kWh/kg	27 kWh/kg

4.4.2 単位設備容量当りの水素製造量

ここでは、熱出力 2,500MWt の水素製造 FBR を想定し、低温水蒸気改質法および水電解法による水素製造量を概算する。

(1) 低温水蒸気改質法

水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー $Q_H=27\text{kWh/kg}$ とし、熱出力 $Q_T=2,500\text{ MWt}$ の水素製造プラントで表 4.1 に示す所内負荷 ($Q_1\sim Q_6$) を想定した場合の水素製造量 W_R は、(12)式より毎時約 78.7 tonH₂ ($\cong 87.6\times 10^4\text{Nm}^3\text{H}_2$) と計算される。

$$W_R = \frac{Q_T - (Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5)}{(Q_3 + Q_6 + Q_H)} = \frac{2.5 \times 10^6 - (5 \times 10^3 + 100 \times 10^3 + 25 \times 10^3 + 0)}{(0.7 + 2.4 + 27)} \quad (12)$$

(2) 水電解法

水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー $Q_H=92\text{kWh/kg}$ として、前項と同様に水素製造量 W_E を(12')式より求めると毎時約 25.6tonH₂ ($\cong 28.5\times 10^4\text{Nm}^3\text{H}_2$) と計算される。

$$W_E = \frac{Q_T - (Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5)}{(Q_3 + Q_6 + Q_H)} = \frac{2.5 \times 10^6 - (5 \times 10^3 + 100 \times 10^3 + 0 + 12.5 \times 10^3)}{(1.1 + 0 + 92)} \quad (12')$$

4.4.3 単位設備容量当りの物質流量

ここでは、前記 4.4.2 項で求めた水素製造量に基づいて低温水蒸気改質法と水電解法における時間当りの物質流量を設定する。

(1) 低温水蒸気改質法

低温水蒸気改質法における水素製造プロセスの入力物質は原料用メタンガスと改質用水蒸気（水）である。また、出力物質は水素ガス、CO₂ および回収蒸気とする。

なお、オフガス中のメタンガスや CO はリサイクル工程によって全て水素や CO₂ に転化されるものと仮定する。

① メタンガス供給量

低温水蒸気改質法では、水素ガス 1mol 当り 1/4mol の原料用メタンガスを要するため、メタンガス供給量は水素製造量および水素とメタンのモル比、各分子量の比より毎時約 157ton CH₄ ($\approx 21.9 \times 10^4 \text{Nm}^3 \text{CH}_4$, at. $\rho_{\text{CH}_4} = 0.717 \text{kg/m}^3$) と計算される。また、原料用メタンガスの潜在エネルギー量は、メタン 1kg 当りの発熱量 13.9kWh/kg を用いて約 2,180MW (=150,000kg/h \times 13.9 kWh/kg) と求められる。

なお、メタンを主成分とする天然ガスの輸入価格（通関 CIF ベース*、平成 13 年 6 月実績 2 万 9,280 円/ton）を参考にした原料ガスのコストは、水素ガス 1kg 当り約 59 円/kg-H₂ と見積もられる^[32]。

② 給水量

水蒸気とメタンの体積比を表すスチームカーボン比が 3.3 の場合、水素と水のモル比は 1:0.825 となるため、給水量は水素製造量および水素と水のモル比、各分子量の比より毎時約 584ton H₂O (585m³ H₂O, at. $\rho_{\text{w}} = 999.1 \text{kg/m}^3$) と計算される。

③ CO₂ 発生量

(4)式の熱化学平衡反応では、メタンと水の吸熱反応によって水素 1mol と二酸化炭素 1/4mol が生成されることから、二酸化炭素発生量は水素製造量ならびに水素と CO₂ のモル比、各分子量の比より毎時 433 ton CO₂ ($21.9 \times 10^4 \text{Nm}^3 \text{CO}_2$, at. $\rho_{\text{CO}_2} = 1.977 \text{kg/m}^3$) と計算される。

なお、水素ガス 1kg 当りの CO₂ 回収・処分コストは、工業技術院の赤井氏による LNG 複合火力の CO₂ 回収処理コストの分析結果^[33]を参考にすると、約 43 円/kg-H₂～約 57 円/kg-H₂ と推定される。

* 船積諸費用(Cost)、保険(Insurance)、揚港までの海上運賃(Freight)を含んだ価格

④ 回収蒸気（水）量

前記②項の給水量は、改質器へのカーボン付着の抑制とメタンガスの水素転化の助長を図るため理論給水量に裕度を見込んでいる。この裕度分は、メタンガスが水素と CO_2 に全て転化した場合でもオフガス中に残存することから、冷却後、給水としてリサイクルが見込まれる。(4)式の熱化学平衡反応では、水素と水のモル比が 1:0.5 であることから、理論給水量は水素製造量および水素と水のモル比、各分子量の比より毎時約 354ton H_2O (354 m^3 H_2O 、 $\text{at. } \rho_w=999.1\text{kg/m}^3$) になる。したがって、回収蒸気（水）量は給水量約 584ton と理論給水量約 354ton の差から毎時約 230 ton と計算される。

以上の①～④より、低温水蒸気改質法を採用した水素製造 FBR の概略的な物質流量は図 4.1 のように整理される。

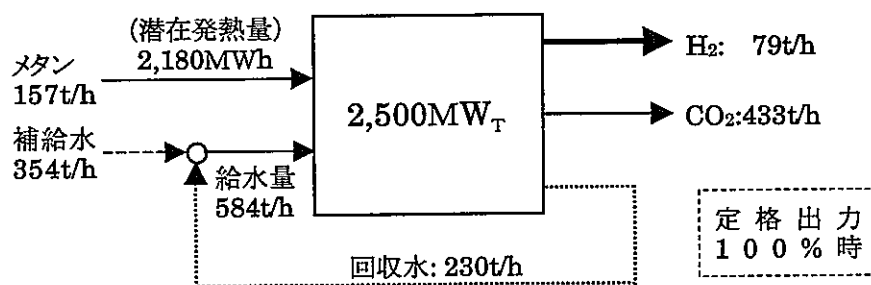


図 4.1 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の物質フロー図

(2) 水電解法

水電解法における評価対象物質は、電気分解に供する水(H_2O)と、水から分離した酸素(O_2)である。

① 給水量

前出の IAEA 報告書によると、水電気分解法における給水量は水素ガス 1 Nm^3 当り 1 リットル (理論的な最少量は約 0.8 リットル) が必要とされている^[28]。水素ガス密度 $\rho_H=0.0899\text{kg/m}^3$ 、水の密度 $\rho_w=999.1\text{kg/m}^3$ (at.288K, 0.1MPa) の条件下では、水素ガス 1kg 当りの給水量は約 11.1kg になるため、熱出力 2,500MWt の水素製造 FBR では毎時約 25.6ton H_2 の水素ガスが製造されることから、給水量は毎時約 284ton H_2O となる。給水量毎時約 284ton H_2O は理論給水量に対して約 20%の裕度を見込んでいるため、裕度分は回収水としてリサイクルされるものとする。

② 酸素発生量

水電解法では水 1mol から 1mol の水素と 1/2mol の酸素が生成されるため、酸素発生量は水素製造量および水素と酸素のモル比、各分子量の比より毎時約 205ton O₂ ($\div 14.3 \times 10^4 \text{Nm}^3 \text{O}_2$, at. $\rho_{\text{O}_2} = 1.429 \text{kg/m}^3$) と計算される。

ちなみに副生成ガスの酸素は産業分野や医療分野を中心に需要が多く、日本産業ガス協会調べによる 2000 年の国内生産量は $1.75 \times 10^9 \text{m}^3$ 、同じく販売量は $1.83 \times 10^9 \text{m}^3$ とされている。また、酸素の販売価格は純度に応じて幅があり、一般的に使用される純酸素(純度 99.9%)の価格は 7 m³ ボンベ当たり約 3,000 円、高純度酸素(99.9999%)になると 7 m³ ボンベ当たり 40,000 円程度とされている。すなわち、水電解型水素製造 FBR は水素と酸素を同時に生産するため、水素のみを有用ガスとして生産する低温水蒸気改質法に比べて収益性が高くなる可能性がある。

水電解型水素製造 FBR における概略的な物質流量を図 4.2 に示す。

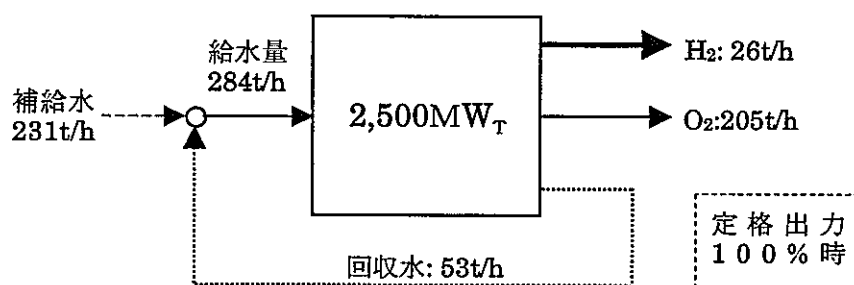


図 4.2 水電気分解型水素製造 FBR の物質フロー図

4.5 水素製造 FBR の熱収支

本章では、低温水蒸気改質法および水電解法による各水素製造 FBR の熱収支について述べる。熱収支の計算は、以下の前提条件に基づいて行う。

- ① 水素製造 FBR の総合効率は、製造された水素ガスの燃焼エネルギーと水素製造 FBR への投入エネルギーの比で表す。
- ② 水素製造エネルギーの他に、系統放熱や所内負荷等によるエネルギー消費を考慮する。
- ③ 水素ガスの燃焼エネルギー量は、真発熱量 33.2kWh/kg ベースとする。
- ④ 低温水蒸気改質法の原料用メタンガスがもつ潜在的な発熱量は、水素製造 FBR への投入エネルギーの一部として扱う。
- ⑤ メタンガスの真発熱量は 13.9kWh/kg とする。

(1) 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の熱収支

低温水蒸気改質法を採用した水素製造 FBR では毎時 79×10^3 kg 程度の水素が製造されたため、その燃焼エネルギーは水素ガスの真発熱量 33.2kWh/kg を用いて $2,625\text{MW}$ と計算される。水素製造 FBR への投入エネルギーは、熱出力 $2,500\text{MW}$ の核熱エネルギーと、原料用メタンガスの潜在発熱量 $2,180\text{MW}$ (メタン真発熱量 $13.9\text{kWh/kg} \times$ メタン流量 157×10^3 kg/h) の合計により $4,680\text{MW}$ となる。また、総合効率は水素ガスの燃焼エネルギー $2,625\text{MW}$ と水素製造 FBR への全投入エネルギー $4,680\text{MW}$ の比から約 0.56 になる。この低温水蒸気改質型水素製造 FBR の熱収支を図 4.3 に示す。

(2) 水電解型水素製造 FBR の熱収支

水電解法を採用した水素製造 FBR では毎時 26×10^3 kg 程度の水素が製造されたため、その燃焼エネルギーは水素ガスの真発熱量 33.2kWh/kg を用いて 864MW と計算される。また、水素製造 FBR の投入エネルギーは熱出力 $2,500\text{MW}$ の核熱エネルギーのみであるため、水素ガスの燃焼エネルギー 864MW との比から総合効率は約 0.35 となる。この水電解型水素製造 FBR の熱収支を図 4.4 に示す。

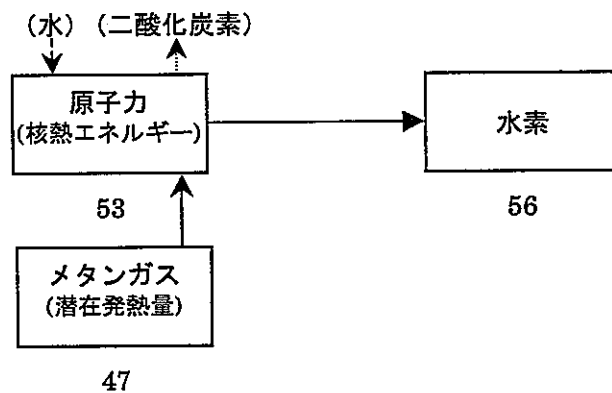


図 4.3 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の熱収支

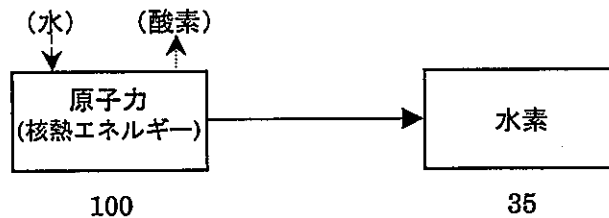


図 4.4 水電気分解型水素製造 FBR の熱収支

4.6 水素製造 FBR の導入規模

4.6.1 代表計算

ここでは、国内の運輸部門における自動車全てが水素燃料電池自動車に置き換わると見込まれる 2055 年の水素消費量 $12.79 \times 10^{10} \text{Nm}^3$ (標準ケース) を代表値として、低温水蒸気改質法と水電解法の各水素製造 FBR の導入規模を計算する。

なお、水素燃料電池自動車の導入見通しおよび水素消費量の算出方法については、参考文献[25]を参照されたい。

(1) 低温水蒸気改質型水素製造 FBR

2055 年の年間水素消費量 $12.79 \times 10^{10} \text{Nm}^3$ を水素ガス密度 0.0899kg/m^3 で質量に換算すると約 $1.15 \times 10^{10} \text{kg}$ になる。また、熱出力 $2,500 \text{MW}_T$ の低温水蒸気改質型水素製造 FBR 単基当りの年間水素製造量は、設備利用率を 90% とした場合には $7.9 \times 10^4 \text{kg/h} \times 24^{\text{h}} \times 365^{\text{d}} \times 0.9$ より $6.23 \times 10^8 \text{kg}$ になる。これより水素製造プラントの必要基数は、年間水素消費量約 $1.15 \times 10^{10} \text{kg}$ を単基当りの年間製造量 $6.23 \times 10^8 \text{kg}$ で除して 19 基 (小数点以下繰り上げ) となる。

(2) 水電解型水素製造 FBR

熱出力 $2,500 \text{MW}_T$ の水電解型水素製造 FBR 単基当りの年間水素製造量は、設備利用率を 90% とした場合には $2.6 \times 10^4 \text{kg/h} \times 24^{\text{h}} \times 365^{\text{d}} \times 0.9$ より $2.05 \times 10^8 \text{kg}$ になる。2055 年における水素製造プラントの必要基数は、年間水素消費量約 $1.15 \times 10^{10} \text{kg}$ を単基当りの年間製造量 $2.05 \times 10^8 \text{kg}$ で除して 57 基 (小数点以下繰り上げ) と計算される。

4.6.2 時系列計算

時系列計算では、水素燃料電池自動車の導入条件が異なる 3 ケース (促進、標準、緩慢) の水素消費見通しを基に、

2000 年から 2100 年までの水素製造 FBR の導入規模を概算する。各ケースの運輸部門の水素消費見通しを図 4.5 に示す。水素燃料電池自動車の導入条件等については、参考文献[25]を参照されたい。

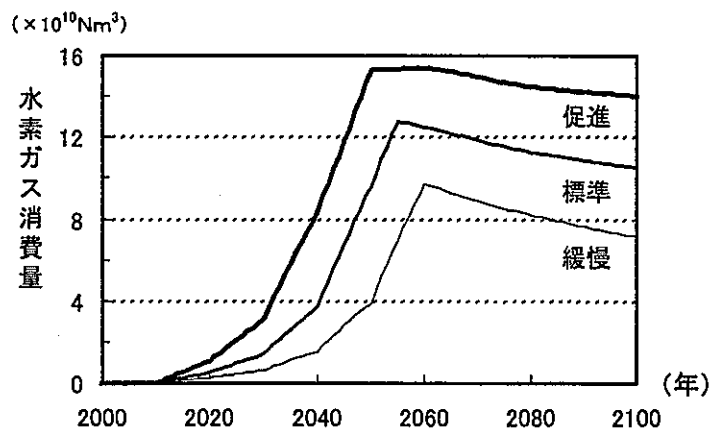


図 4.5 運輸部門における水素消費見通し

(1) 低温水蒸気改質型水素製造 FBR

図 4.6 は、2020 年以降 70GWe 一定で推移する電力供給用設備と、水素製造用に追加する低温水蒸気改質型水素製造 FBR のトータル容量である。低温水蒸気改質型水素製造 FBR の最大ピークは促進ケースが約 23GWe、標準ケースが約 19GWe、緩慢ケースが約 15GWe になる。

(2) 水電解型水素製造 FBR

図 4.7 は、2020 年以降 70GWe 一定で推移する電力供給用設備と、水素製造用に追加する水電解型水素製造 FBR のトータル容量を示している。水電解型水素製造 FBR の最大ピークは促進ケースで約 69GWe、標準ケースで約 57GWe、緩慢ケースで約 44GWe となり、現行の原子力発電設備計画 63 GWe 相当の追加容量になる。

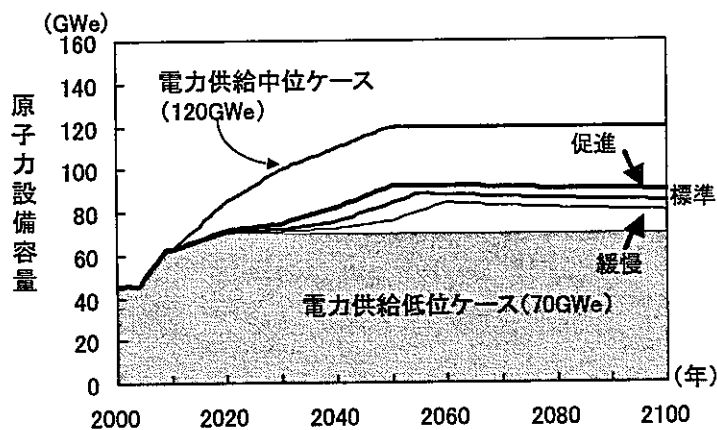


図 4.6 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の設備容量

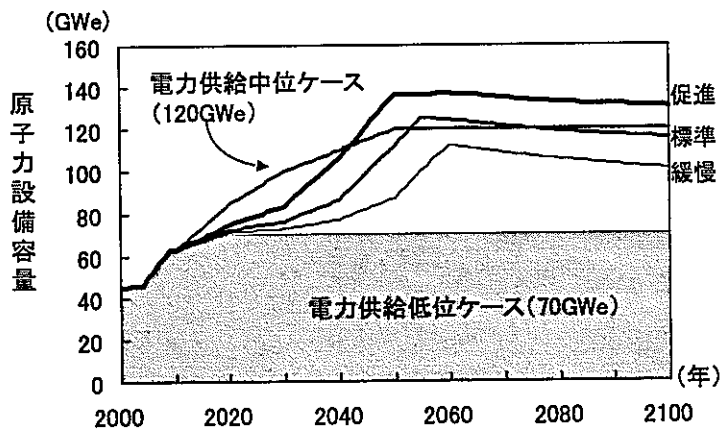


図 4.7 水電気分解型水素製造 FBR の設備容量

4.7 水素製造 FBR の付加価値と付帯費用

ここでは、水電解型水素製造 FBR で副生成ガスとして生産される純酸素の付加価値を、現在の小売価格（純度 99.9%、3,000 円/7Nm³⇔400 円/Nm³）の 1/10 と仮定して求める。また、低温水蒸気改質型水素製造 FBR における付帯費用として、メタンガス原料費と CO₂ 回収処分費を、それぞれ液化天然ガス輸入単価（通関 CIF ベース*、平成 13 年 6 月実績 2 万 9,280 円/ton）^[32]、および工業技術院の赤井氏による CO₂ 回収処理コストの分析結果^[33]を基に概算する。

なお、水素需給条件は、前記 4.6.1 項の代表計算と同一条件とした。

(1) 副生成ガスの付加価値

熱出力 2,500MW_T の水電解型水素製造 FBR では毎時 205ton の酸素が生産されるため、稼働率 90% と仮定した場合の 1 基当りの年間生産量は、 $20.5 \times 10^4 \text{kg/h} \times 365^{\text{d}} \times 24^{\text{h}} \times 0.9$ より約 $16.2 \times 10^8 \text{kg}$ になる。

57 基の全プラントで生産される酸素量は、酸素密度 1.429kg/m³ を用いて $57 \text{基} \times 16.2 \times 10^8 \text{kg} / 1.429 \text{kg/m}^3$ より年間 $6.46 \times 10^{10} \text{m}^3$ と計算され、2000 年 1 月～12 月までの国内販売実績 $1.83 \times 10^9 \text{m}^3$ の約 35 倍に相当する。この副次的に生産される酸素は、現在の国内需要だけで見た場合には過剰供給による価格破壊の原因と成り得るが、水素利用が本格化した場合に収益低下が予想される石油産業や海運産業では、海外を需要先とする新たなビジネスに繋がる可能性が考えられる。例えば、近年では空気の代わりに純酸素を酸化剤に用いる酸素燃焼技術が注目されており、燃焼温度の高温化、排ガス量の削減や窒素酸化物の抑制に繋がるため、加熱炉等での大量消費が期待される。仮に酸素の付加価値を 40 円/Nm³ とした場合の売上高は、 $40 \text{円/Nm}^3 \times \text{年間生産量 } 6.46 \times 10^{10} \text{m}^3$ より約 2.6 兆円と見積もられ、水素製造プラント 1 基当たりでは約 450 億円/年になる。

(2) メタンガス原料費

低温水蒸気改質型水素製造 FBR で想定されるメタンガスの年間消費量は、2055 年の年間水素消費量約 $1.15 \times 10^{10} \text{kg}$ 、水素とメタンのモル比 1/4 ならびに各分子量 (H₂:2g、CH₄:16g) より約 $2.3 \times 10^{10} \text{kg}$ と計算される。また、年間の原料費はメタンガス消費量 $2.3 \times 10^7 \text{ton}$ と液化天然ガス輸入単価 29,280 円/ton の積より約 6,700 億円と見込まれ、水素製造プラント 1 基当たりの原料費はプラント基数 19 で除して約 350 億円/年・基と見積もられる。

* 船積諸費用(Cost)、保険(Insurance)、揚港までの海上運賃(Freight)を含んだ価格

(3) CO₂回収処分費

メタンガス原料費と同様に、低温水蒸気改質型水素製造 FBR で発生する CO₂ の回収処分費を付帯費用として考えた場合、その年間トータル額は水素ガス 1kg 当りの CO₂ 回収処分コスト約 43~57 円/kg-H₂ と 2055 年の年間水素消費量約 1.15×10^{10} kg の積より約 4,900 億円~6,600 億円程度と予想される。また、水素製造プラント 1 基当りの年間 CO₂ 回収処分費は、年間トータル額をプラント基数 19 で除して約 260~350 億円/年・基と概算される。

4.8 物質流量に関する検討結果のまとめ

低温水蒸気改質法と水電解法を採用した水素製造 FBR を想定し、各方式における水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー量、製造エネルギーの試算結果と公表データとの比較検討、水素製造 FBR 単基 (2,500MW_T、送電端効率 40%の発電プラント相当) 当りの物質流量および熱収支について検討を行った。また、これらの検討結果を基に、燃料電池自動車への水素供給を仮定した場合の水素製造 FBR 規模を再計算し、併せて副生成ガスの付加価値と原料ガス等の付帯費用を概算した。

それぞれの検討結果は以下の通り。

- (1) 水素ガス 1kg 当りの製造エネルギー (核熱エネルギー) は、低温水蒸気改質法では約 27 kWh/kg、水電解法では約 92 kWh/kg と試算され、IAEA や電中研の公表値と概ね一致することを確認した。
- (2) 低温水蒸気改質法および水電解法の各水素製造 FBR における時間当りの物質流量を定量化した。

① 低温水蒸気改質型水素製造 FBR

(プロセス入力)	補給水	: 354t/h
	給水量	: 584t/h
	メタンガス	: 157t/h
(プロセス出力)	水素ガス	: 79t/h
	二酸化炭素	: 433t/h
	回収水	: 230t/h

② 水電解型水素製造 FBR

(プロセス入力)	補給水	: 231t/h
	給水量	: 284t/h
(プロセス出力)	水素ガス	: 26t/h
	酸素	: 205t/h
	回収水	: 53t/h

- (3) 運輸部門における水素消費見通しをベースに、水素製造 FBR の導入規模を再計算した。ちなみに標準ケースの 2055 年における水素製造 FBR の導入規模は、低温水蒸気改質型の場合 19GWe 程度、水電解型の場合 57 GWe 程度と推計された。
- (4) 水電解方式の水素製造 FBR で副次的に生産される酸素の付加価値を概算し、単基当り年間約 450 億円の売上高に繋がる酸素販売ビジネスが期待される。
- (5) 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の付帯費用を概算し、メタンガス原料費は単基当り年間 350 億円程度、CO₂回収処分費は同じく約 260～350 億円程度と見積もられた。

5. 回収希少元素の需給ポテンシャル

本章では、使用済み燃料の再処理廃液から回収される希少元素のうち、Pd と Ru の各需給量の試算結果を述べる。

5.1 回収パラジウムの需給試算

5.1.1 パラジウムの需給状況と将来ニーズ

Pd は白金に類似した特性を持ちながら白金よりも安価で軽いため、自動車用触媒や電子機器の低電流電気接点、歯科用合金として多分野で利用されている。Pd の地球埋蔵量は約 2 万トン^[34]とされ、供給シェアはロシア 66%と南アフリカ共和国 25%の二カ国で世界全体の約 90% (2000 年全体供給量 246 トン) を占めている。需要シェアは北米 36%、欧州 28%、日本 24%で世界全体の約 90% (2000 年全体需要量 261 トン) を占めている。Pd の国内生産量は 1980 年代半ばまでは年間 0.6~0.8 トン程度の規模であったが、現在は国内需要の 97%程度を輸入に依存し、3%程度が使用済み触媒等のリサイクルによる二次供給で賄われている。

また、Pd は水素の吸収・透過性に優れているため水素貯蔵合金や水素分離膜の母材にも利用されており、東京ガスと三菱重工では Pd 膜を水素分離型改質器 (メンブレンリアクタ) に用いた水素製造装置を開発している^{[22],[23]}。このメンブレンリアクタ型水素製造装置は、改質器に組み込んだ Pd 合金分離膜で水素を選択的に透過するため、従来よりも低い改質温度 (FBR 運転温度相当の 550°C程度) で高純度水素が製造できることから、家庭用コージェネレーションや小規模な水素ステーションとしてのオンサイト型水素製造装置、あるいは低温水蒸気改質型水素製造 FBR のような大規模システムで活用が見込まれている。水素利用が本格化した場合、Pd はメンブレンリアクタの水素分離膜としての需要拡大が期待される。

5.1.2 水素分離膜としてのパラジウム需給量の試算

ここでは低温水蒸気改質型水素製造 FBR の導入を想定し、水素分離膜に用いる Pd 需要量の計算条件、回収 Pd の計算条件、Pd 需給量の試算結果を述べる。

(1) Pd 需要量の計算条件

(i) メンブレンリアクタ型水素製造装置の水素分離膜仕様と水素透過率

メンブレンリアクタの水素分離膜仕様 (面積、重量) と水素透過率は、参考文献^[23]の公表値を用いて、それぞれ約 5m²、約 1kg (膜厚 20 μm)、26Nm³/hr・m²とした。

(ii) 2,500MW_Tクラスの低温水蒸気改質型水素製造 FBR の水素分離膜重量

低温水蒸気改質型水素製造 FBR (以後、水素製造 FBR という) の基準熱出力は、発電用 FBR (送電端効率 40%、電気出力 1,000MWe) の熱出力と同等

と考え $2,500\text{MW}_t$ とした。熱出力 $2,500\text{MW}_t$ の水素製造 FBR 単基が必要とする水素分離膜重量は、先ず単位時間当りの水素製造量 $87.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{hr}$ (詳細は第 4 章を参照されたい) を前記(i)の水素透過率 $26 \text{Nm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^2$ で除して水素分離膜の必要面積 $3.38 \times 10^4 \text{m}^2$ を求め、この水素分離膜面積と Pd 密度 ($12.02 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$)^[35]及び膜厚 $20 \mu\text{m}$ の積より約 $8,000\text{kg}$ と計算した。

(iii) 水素消費量と水素製造 FBR の導入条件

水素需要量の想定条件には、運輸部門における水素燃料電池自動車の水素消費量見通し (基準ケース) を用いる^[25]。図 5.1 に運輸部門の水素消費見通しを示す。

水素製造 FBR の導入開始は 2030 年とし、2030 年以降に運輸部門で消費される水素は水素製造 FBR によって供給されるものと仮定する。また、水素製造 FBR の寿命は 60 年とし、図 5.2 に示す設備導入計画で新設ならびに更新が行われるものと仮定する。

なお、図 5.2 の設備容量は、送電端効率 40%と仮定して発電設備容量に等価換算したものである。

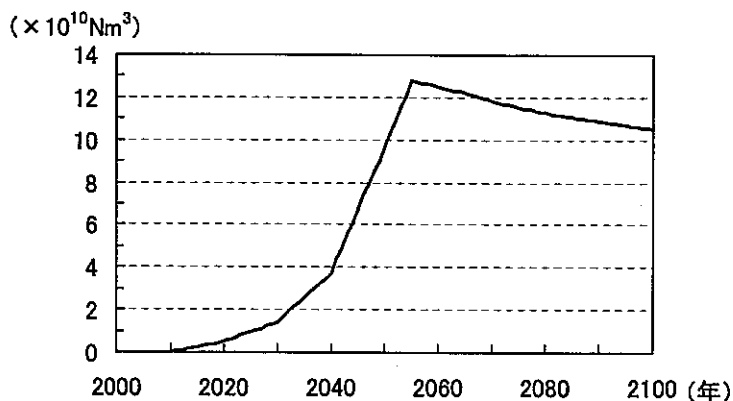


図 5.1 運輸部門における水素燃料電池自動車の水素消費見通し (基準ケース)

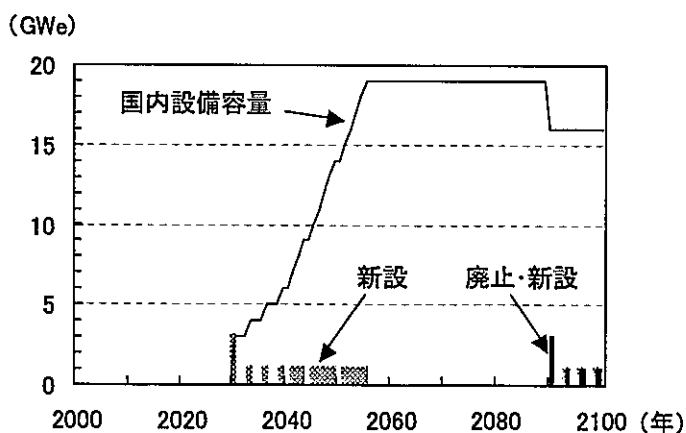


図 5.2 低温水蒸気改質型水素製造 FBR の設備容量 (電力設備等価換算)

(2) 回収 Pd の計算条件

(i) 軽水炉使用済み燃料中の Pd 量

小澤等の検討^[36]によると、軽水炉プラントの発電設備容量を 5 万 MWe と仮定した場合、1 年間に取り出される使用済み燃料には約 2 トン（燃焼度約 4 万 MWd/t の場合）の Pd が含まれるとされており、さらに再処理廃液から電解析出法によって回収できる Pd 量は 1.7 トン程度と推定されている。軽水炉使用済み燃料中の Pd 含有量は、燃料集合体の燃焼度に概ね比例するため、再処理廃液から回収される Pd 量も燃料集合体の燃焼度に応じて増減するものとし、燃焼度 3 万 MWd/t の場合には約 1.3 トン（3/4 倍）、燃焼度 6 万 MWd/t の場合には約 2.5 トン（6/4 倍）と仮定する。

(ii) 軽水炉再処理条件

軽水炉使用済み燃料の再処理計画は、現行の六ヶ所再処理工場計画に合わせて 2005 年試運転開始とし、再処理能力は今世紀末まで年間 800 トンとする。

また、再処理が行われる軽水炉使用済み燃料の燃焼度は、順次高くなると考えられることから、本試算では 2009 年までは 3 万 MWd/t 台、2010 年～2029 年までは 4 万 MWd/t 台、2030 年以降は 6 万 MWd/t 台と仮定する。表 5.1 に軽水炉使用済み燃料再処理設備容量の想定条件を示す。

なお、六ヶ所再処理工場の再処理廃液プロセスには有用元素の回収工程は設置されていないが、ここでは運転開始時に回収工程も稼働すると仮定している。

表 5.1 軽水炉再処理の想定条件

年	2000	2005	2006	2007	2008	2010	2030	2100
設備容量 t-HM/年	0	800	800	800	800	800	800	800
再処理量 t-HM/年	0	320	480	640	800	800	800	800
燃焼度 万 MWd/t	3	3	3	3	3	4	6	6

(3) Pd 需給量の試算結果

水素製造 FBR を新設した場合の Pd の累積需要量と、軽水炉再処理施設からの累積回収量を図 5.3 に示す。Pd の需要時期は、水素分離膜の加工や改質器への組み込み等の製作工程を考慮するとプラント運転開始より数年前に遡るが、ここでは評価を簡便化するため運転開始時期に対応させている。

Pd の累積需要量は 2050 年頃には約 120 トン、2100 年では 180 トン程度と見

込まれる。Pdの累積需要量が2060年頃から2090年頃まで安定している理由は、運輸部門の水素消費量（図5.1参照）が2055年頃から徐々に減少しているためであり、運輸部門以外の水素消費（例えば工業用原料水素、民生部門の水素利用）を考慮に入れた場合、水素製造FBRならびにPdの累積需要量は増加する可能性がある。また、2090年以降は水素製造FBRのリプレイスによって再びPdの累積需要量が増加している。

一方、回収Pdの累積量は、2050年時点で約80トン、2100年時点には累積需要量とほぼ同程度の約180トン（地球埋蔵量の1%程度に相当）と見込まれる。現在の軽水炉再処理計画では、再処理廃液からの有用元素の回収は計画されていないが、仮に2005年から回収した場合、水素製造FBRに用いるPdの海外依存率は概ね半減すると予想される。プラント寿命期間中にメンブレンリアクタの定期的に交換すると、Pd需要量はその交換頻度に応じて倍増するため回収Pdだけでは充足しない可能性がある。しかしながら、メンブレンリアクタから取外した水素分離膜のリサイクルを積極的に進めることにより、水素製造FBRに用いるPdの海外供給量はいずれ飽和するものと考えられる。

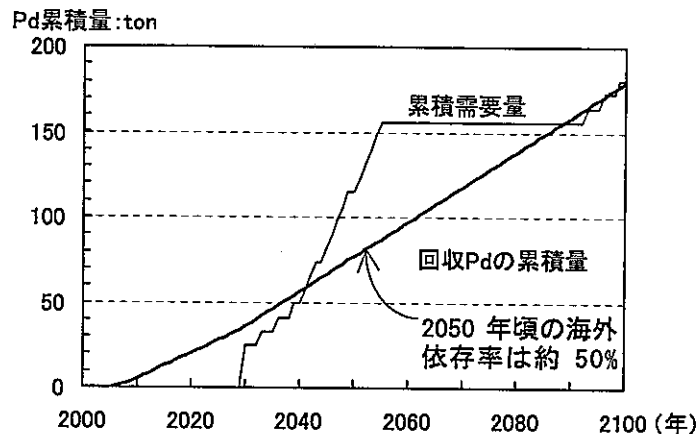


図5.3 Pdの累積需要量と回収Pdの累積量の試算結果

5.2 回収ルテニウムの需給試算

5.2.1 ルテニウムの需給状況と将来ニーズ

Ruは電気抵抗、チタンパイプの合金元素、ハードディスク等の磁気コーティングや触媒等に使用されている。1999年の世界のRu需要量は約12トンとされ、前出のPd需要量（約250トン）に比べ規模は少ないが、将来的には水から水素を製造する光触媒^[37]や、東工大の秋鹿教授等が発明したRu系アンモニア合成触媒^{[38]-[41]}としての新たな需要が期待される。とくにRu系触媒を用いたアンモニア合成プロ

セスは、次世代のアンモニア製造技術として注目されており、米国のハリバートン KBR 社 (Halliburton Kellogg Brown & Root, Inc) では、Ru 系触媒を採用したアンモニア合成プラントの試運転が商業ベースで行われている。このハリバートン KBR 社によると、Ru 系触媒を使用したプラントでは、鉄系触媒を用いた従来のプロセスに比べ約 40%の増産、15%程度の省エネ、低圧設計によるコスト低減が見込まれるとしている^[41]。また、Ru 系触媒の活性性能は鉄系触媒 (参考までにアンモニア合成に用いる工業用触媒の寿命は約 2~3 年^[42]) の 20 倍程度とされている^[43]。アンモニアは、現在では食糧生産に欠かせない化学肥料をはじめ、合成樹脂や合成繊維等の基礎原料として幅広い分野で利用されている。その需要は、増加する世界人口と共に今後も増え続けると予想されることから、アンモニア合成触媒ならびに NO_x 固定触媒 (アンモニアへの還元) として回収 Ru の利用が考えられる。

5.2.2 アンモニア合成触媒としてのルテニウム需給量の試算

ここでは、軽水炉使用済み燃料の再処理廃液から回収される Ru 量と、回収 Ru をアンモニア合成触媒に用いた場合の供給規模について述べる。

(1) 回収 Ru の計算条件

(i) 軽水炉使用済み燃料中の Ru 量

軽水炉使用済み燃料中の Ru 量は、Pd と同様に前出の小澤等の検討^[36]に基づいて計算する。軽水炉プラントの発電設備容量を 5 万 MWe と仮定した場合、1 年間に取り出される使用済み燃料には約 3.4 トン (燃焼度約 4 万 MWd/t の場合) の Ru が含まれるとされており、さらに再処理廃液から電解析出法によって回収できる Ru 量は 2.7 トン程度と推定されている。また、軽水炉使用済み燃料中の Ru 含有量は燃料集合体の燃焼度に概ね比例するため、再処理廃液から回収される Ru 量は燃料集合体の燃焼度に応じて増減するものとし、燃焼度 3 万 MWd/t の場合には約 1.8 トン (3/4 倍)、燃焼度 6 万 MWd/t の場合には約 3.6 トン (6/4 倍) と仮定する。

(ii) 軽水炉再処理条件

軽水炉使用済み燃料の再処理計画は、現行の六ヶ所再処理工場計画に合わせて 2005 年試運転開始とし、再処理能力は今世紀末まで年間 800 トンとする。

また、再処理が行われる軽水炉使用済み燃料の燃焼度は、回収 Pd の試算と同様に 2009 年までは 3 万 MWd/t 台、2010 年~2029 年までは 4 万 MWd/t 台、2030 年以降は 6 万 MWd/t 台と仮定する。さらに、六ヶ所再処理工場の再処理廃液プロセスには有用元素の回収工程は設置されていないが、ここでは運転開始時に同回収工程の稼動を仮定する。

(2) アンモニア合成触媒としての Ru 需要量の概算

ここでは、アンモニア合成触媒の一つである Ru/HSAG (High Surface Area Graphites) を例として、この触媒に含まれる Ru 量およびアンモニアプラントの Ru 需要量を求める。

(i) Ru/HSAG 触媒の Ru 量

Ru/HSAG 触媒に含まれる Ru 量は、I.Rossetti 等の公表値を基に算出する^[43]。I.Rossetti 等によると、Ru/HSAG 触媒の構成元素は活性炭素、Ru、カリウム (K)、セシウム (Cs)、バリウム (Ba) とされ、Ru の含有率は触媒重量に対して 3.8wt.% と報告されている。この Ru/HSAG 触媒の組成の一例を表 5.2 に示す。

表 5.2 Ru/HSAG 触媒の一例

元素	Ru に対するモル比 (mol / mol Ru)	1 モル当りの重量 (g/mol)	重量 (g)
活性炭素	183.5 ^{*1}	12.0	2,203
ルテニウム (Ru)	1.0	101.1	101
カリウム (K)	3.6	39.1	141
セシウム (Cs)	1.0	132.9	133
バリウム (Ba)	0.6	137.3	82
触媒			2,660

(備考) 参考文献[43]に基づく計算結果

*1: 触媒重量と炭素のモル重量 12.01g/mol から逆算したモル比

(ii) アンモニアプラントにおける Ru 需要量

Ru 触媒に限らず、アンモニア製造量と触媒量との関係を示すデータは企業戦略の観点から一般的に公表されていない。ここでは、米国ライス大学の Villesca J. 等がアンモニアプラントのシミュレーション解析^[44]で採用した運転条件と触媒量を参考にして Ru 触媒量を概算する。

Villesca J. 等は、米国テキサス州の Haldor-Topsoe プラントの物理的データを基に、生産量が 1,000 トン/日のアンモニアプラントの運転状態を解析的に評価した。この解析では、鉄系触媒を用いたアンモニアプラントの評価の他に、Ru 系触媒を併用した KAAP (Kellogg Advanced Ammonia Process) の分析も行われている。Villesca J. 等のレポートによると、鉄系触媒は第 1 反応器 (容積 35m³) と第 2 反応器 (容積 75m³) に、それぞれ 70% 程度収容されるとしている。ここでは、ハリバートン KBR 社の KAAP を参考にして、第 2 反応器に Ru 系触媒が 50m³ (≒75m³×0.7) 収容されるものと仮定する。また、Ru 系触

媒の比体積は、前出の I.Rossetti 等の文献 [43] で公表されている $0.49\text{cm}^3/\text{g}$ とする。Ru 系触媒の重量は、Ru 系触媒の収容体積と比体積の積から約 102 トン/基と計算される。また、Ru 量は触媒重量に対して 3.8wt.%含有していることから、約 4 トンと見積もられる。

ちなみに、全てのアンモニアプラントが Ru 系触媒を用いた場合に必要とされる Ru 量は、1998 年度の国内と世界の各アンモニア生産量をベースに計算すると、次の通り計算される。なお、Ru 系触媒を用いた場合のアンモニア製造量は鉄系触媒よりも増加すると予想されるが、ここでは Villesca J.等の解析による鉄系触媒のアンモニア製造量 1,016 トン/日 (稼働率 100%) を用いて保守的に評価する。

① 国内のアンモニア生産量 (167 万トン) に基づく Ru 需要量の試算

- ・ 日産 1,000 トンのプラントで規格した場合の プラント数 (稼働率 80% 仮定)

$$167 \times 10^4 \text{ トン/年} \div (1,000 \text{ トン/日} \times 365 \text{ 日} \times 0.8) \doteq \underline{6 \text{ 基}}$$

- ・ Ru 系触媒量 (6 基合計)

$$1,000 \text{ トン/日} \div 1,016 \text{ トン/日} \times 102 \text{ トン/基} \times 6 \text{ 基} \doteq \underline{600 \text{ トン}}$$

- ・ Ru 量 (6 基合計)

$$600 \text{ トン} \times 3.8\text{wt.}\% \doteq \underline{23 \text{ トン}}$$

② 世界のアンモニア生産量 (10,600 万トン) に基づく Ru 需要量の試算

- ・ 日産 1,000 トンのプラントで規格した場合の プラント数 (稼働率 80% 仮定)

$$106 \times 10^6 \text{ トン/年} \div (1,000 \text{ トン/日} \times 365 \text{ 日} \times 0.8) \doteq \underline{360 \text{ 基}}$$

- ・ Ru 系触媒量 (360 基合計)

$$1,000 \text{ トン/日} \div 1,016 \text{ トン/日} \times 102 \text{ トン/基} \times 360 \text{ 基} \doteq \underline{36,000 \text{ トン}}$$

- ・ Ru 量 (360 基合計)

$$36,000 \text{ トン} \times 3.8\text{wt.}\% \doteq \underline{1,370 \text{ トン}} \text{ (地球埋蔵量の約 30\%)}$$

(3) 回収 Ru 量とアンモニア合成用 Ru 系触媒の供給規模に関する試算結果

前記の(1)項と(2)項の計算条件に基づいて計算される回収 Ru 量、および回収 Ru をアンモニア合成用の Ru 系触媒として利用する場合に供給可能なプラント規模 (日産 1,000 トンで規格化、稼働率 80% 仮定) を図 5.4 に示す。軽水炉再処理施設が今世紀末までに年間 800 トンの使用済み燃料を再処理した場合、その再処理廃液から回収が期待される Ru 量は累計で約 280 トン (地球埋蔵量の約 6% に相当) と見込まれる。この回収 Ru を国内のアンモニアプラントで触媒として利用する場合、回収開始から 10 年程度で国内規模 6 基 (日産 1,000 トンで規格化、稼働率 80% 仮定、アンモニア生産量 1998 年と同一) に相当する Ru 量が確保で

きる。一方、世界全体のアンモニアプラントを対象にした場合、世界の需要規模約 360 基（日産 1,000 トンで規格化、稼働率 80% 假定、アンモニア生産量 1998 年と同一）の約 1/5 に相当する約 70 基への供給が期待される。

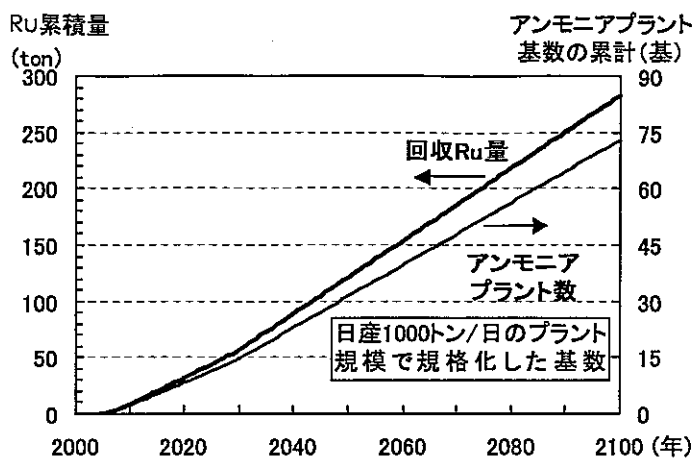


図 5.4 回収 Ru 量とアンモニア合成用 Ru 系触媒の供給規模の試算結果

6. 回収希少元素の比放射能

使用済み燃料の再処理廃液から回収される希少元素は放射性であるため、その利用に当っては放射能の減衰待ち貯蔵や用途の制限等が想定される。図 6.1 は、主な希少元素 FP の比放射能の経時特性をグラフ化したものである。グラフ中央の太い実線は、原子炉規制法による低レベル放射性廃棄物濃度の上限値 ($1 \times 10^7 \text{Bq/g}$) を示す。また、網掛けの領域に位置する破線は、クリアランスレベル ($1 \times 10^2 \text{Bq/g}$) を示している。

Pd の比放射能は、半減期が極めて長い ^{107}Pd (半減期約 6.5×10^6 年) の影響により、おおよそ 10 の 6 乗オーダーにあるため低レベル放射性廃棄物と同等な管理・運用を必要とする。したがって、回収 Pd の利用は、水素製造 FBR のように放射線管理区域の設定が比較的容易な原子力施設等に制限される。一方、Ru を低レベル放射性廃棄物として扱うためには 20 年程度の減衰待ち貯蔵が必要である (半減期 1.025 年の ^{106}Ru の影響により)。しかしながら Ru の比放射能は、回収から約 40 年後にはクリアランスレベル以下に減衰すると予想されるため、回収 Ru は適切な減衰期間を経た後には一般産業での利用も期待できる。

なお、再処理廃液から回収される希少元素は、安定同位体と長寿命同位体との分離や、二次的に生じ得る被放射化の影響評価を行うことにより、金属資源としての利用促進が図れるものと考えられる。

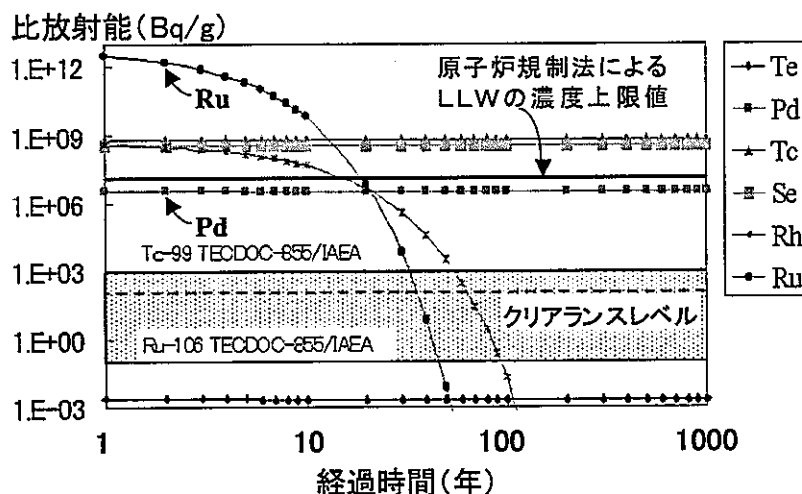


図 6.1 希少元素 FP の比放射能の経時特性

7. まとめ

水素は、地球環境保全と資源保護の観点から次世代のエネルギーキャリアとして注目されている。将来の水素利用社会では、燃料電池の電極や水素改質器の部材として白金族系元素の需要増加が予想される。また、水素を工業原料に用いた産業分野でも、省エネや生産性向上のために白金族系元素の需要増加が見込まれる。この白金族系元素は埋蔵量が少なく、需給地域が偏在し、流通や市場動向が不安定なことから、水素利用社会においてはエネルギーセキュリティの上で安定供給が望まれる戦略的元素と成る可能性がある。

本研究では、環境保全政策と水素利用を 21 世紀の潮流として捉え、その取り組み状況を概括すると共に、水素利用社会を想定した資源とエネルギーフローの概念について検討を行った。また、核燃料サイクルとソフトパス（分散電源、燃料電池自動車、化学プラント等）の新たな協調概念について検討を行い、原子炉による電力や水素の生産に加えて、再処理側で白金族系元素の国内生産に取り組むシナリオを提案し、代表例として Pd と Ru の需給ポテンシャルを試算した。

水素製造 FBR 導入量、回収元素の需給量と利用課題に関して以下の知見を得た。

- (1) 低温水蒸気改質型と水電解型の水素製造 FBR の物質流量を把握すると共に、運輸部門の水素消費見通しを基にそれぞれの導入規模を試算した。ちなみに標準ケースの 2055 年における水素製造 FBR の導入規模は、低温水蒸気改質型の場合 19GWe 程度、水電解型の場合 57 GWe 程度と推計された。
- (2) 年間再処理量 800 トンの軽水炉再処理で仮に 2005 年から有用元素を回収した場合、回収 Pd 量は 2100 年までの累計で 180 トン程度と想定される。
- (3) また、水素製造 FBR の水素分離膜に用いる Pd 需要量は、2100 年時点で約 180 トンと試算され、軽水炉使用済燃料からの回収 Pd 量とほぼ同程度と見込まれる。
- (4) 回収 Pd は、比放射能が $1.0 \times 10^6 \text{Bq/g}$ 程度と見込まれるため、低レベル放射性廃棄物と同等の管理・運用を必要とする。
- (5) 2005 年から Ru を回収した場合、2100 年時点の回収量は累計で 280 トン程度と想定される。
- (6) 回収 Ru をアンモニア合成触媒に用いた場合、2100 年時点の回収量で約 70 基のアンモニアプラント（日産 1,000 トン、稼働率 80%）に供給が見込まれる。
- (7) Ru を低レベル放射性廃棄物として扱うためには 20 年程度の減衰待ち貯蔵が必要である。しかし、Ru の比放射能は、回収から約 40 年後にはクリアランスレベル以下まで減衰すると予想されるため、その後一般産業で利用が期待できる。
- (8) 再処理廃液から回収される希少元素は、放射性安定同位体と長寿命同位体との分離や、二次的に生じ得る被放射化の影響評価を行うことにより、金属資源としての利用促進が図れるものと考えられる。

8. おわりに

本研究では、今世紀の社会的潮流に適した核燃料サイクルとソフトパスの協調概念を提案すると共に、水素利用社会で戦略的要素に成り得る白金族系元素を再処理廃液から回収した場合の需給ポテンシャルについて試算した。今後は、環境に配慮した資源とエネルギーの供給システムを提案するために、回収元素についてはFBRサイクルを含めた供給ポテンシャルや経済性を評価する。また、エネルギー供給については、電力と水素の需給を通じて、火力や原子力のような大規模設備とコージェネレーション等の分散型設備が協調的に機能するシステム概念を具体化し、それに必要なインフラストラクチャー概念の検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 旧環境庁・中央環境審議会答申：“環境基本計画－環境の世紀への道しるべ－”、平成 12 年 12 月 22 日閣議決定
- [2] 日刊工業新聞 (2002 年 6 月 13 日付)
- [3] 経済産業省・総合資源エネルギー調査会総合部会／需給部会報告書：“今後のエネルギー政策について”、平成 13 年 7 月
- [4] エネルギー・資源学会編：“21 世紀社会の選択 エネルギー・環境制約下での発展のために”、財団法人省エネルギーセンター (2000)
- [5] 茅陽一監修,(財)地球環境産業技術研究機構編著：“CO₂削減戦略”、日刊工業新聞社 (2000)
- [6] 大角泰章：“クリーンエネルギー・水素”、アグネ技術センター (1993)
- [7] 緒方寛：“WE-NET プロジェクトに関連する海外技術開発能の動向”、季報エネルギー総合工学、第 24 巻第 4 号 (2002)
- [8] 太田時男：“水素エネルギー・システム実用化への展望”、燃料協会誌第 70 巻第 6 号 (1991)
- [9] 太田時男：“ソフト・エネルギー”、講談社 (1980)
- [10] 太田時男、“水素エネルギーシステム”、森北出版株式会社(1987)
- [11] 堀雅夫：“原子力による水素の生産”、日本原子力学会誌 Vol.43、No.10、p.30～p.34 (2001)
- [12] NSA/COMMENTARIES No.10 “原子力による水素エネルギー”、(財)日本原子力産業会議・原子力システム研究懇話会、(2002)
- [13] OECD/NEA: “Nuclear Production of Hydrogen” ,First Information Exchange Meeting Paris, France 2-3 Oct.2000
- [14] American Nuclear Association Winter Meeting ,Reno, Nevada Nov. 2001
- [15] Amory B. Lovins 著、室田泰弘、槌谷治紀訳：“ソフト・エネルギー・パス”、時事通信社 (1979)
- [16] 茅陽一、鈴木浩、中上英俊、西廣泰輝：“エネルギー新時代 ホロニック・パスに向けて”、(財)省エネルギーセンター (1988)
- [17] 第 2 回総合エネルギー調査会新エネルギー部会配布資料：“資料 2 新エネルギーの潜在性と経済性”、(平成 12 年 1 月 27 日開催)
- [18] 佐野雄一：“電解還元析出法によるテクネチウム及び白金族元素の回収技術”、JNC TN1340 2001-007 サイクル機構技報No.12 (2001.9)
- [19] 小澤正基、佐野雄一、篠田佳彦、池上哲雄：“長寿命核種の分離研究における新戦略”、日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集、p.791 (2001)

- [20] J.R.Hufton, S.Mayorga, and S.Sircar:“Sorptions-Enhanced Reaction Process for Hydrogen Production”, AIChE Journal, Vol.45,No.2, p248-256 (1999.2)
- [21] J.Hufton, W.Waldron, S.Weigel and et al. : “Sorptions Enhanced Reaction Process (SERP) for the Production of Hydrogen”, Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-28890,(2000)
- [22] 白崎義則、太田洋州、小林一登、黒田健之助:“都市ガスから直接水素を製造する水素分離型改質器の開発”、水素エネルギーシステム Vol.22,No.1(1997)
- [23] 藤本芳正、小林一登、平野昌宏、安田勇、白崎義則:“メンブレンリアクタ型水素発生装置の開発”、三菱重工技報 Vol.38,No.5 (2001-9)
- [24] 原子力水素研究会:“原子力による水素エネルギー”、日本原子力産業会議・原子力システム研究懇話会 (平成 14 年 6 月)
- [25] 篠田佳彦、大滝明、小藤博英、小野清、平尾和則:“総合技術検討書 ー実用化戦略調査研究 (フェーズ I) 成果報告書ー”、JNC TN9400 2001-061、(2001 年 3 月)
- [26] 篠田佳彦、大滝明、小藤博英、小野清、平尾和則:“高速増殖炉サイクルの特性評価”、JNC TN1340 2001-008 サイクル機構技報 No.12 別冊 (2001.9)
- [27] 大滝明、小野清、平尾和則:“FBR による水素製造シナリオの検討”、日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集、B37、(2001)
- [28] IAEA-TECDOC-1085. : “Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power” (1999)
- [29] 電中研編著:“次世代エネルギー構想 このままでは資源が枯渇する”、電力新報社 (1998)
- [30] 大滝, TN9410 92-032: “大型 F B R 設計研究 (平成 3 年度上期) 高温待機状態の成立性に関する系統降温特性調査結果” ,1991 年 9 月
- [31] エネルギー・資源学会編:“エネルギー・資源ハンドブック” ,p.707,(1996)
- [32] 経済産業省「エネルギー生産、需給統計月報」(平成 13 年 6 月)
- [33] 赤井誠:“CO₂の隔離技術”,日本エネルギー学会誌,第 76 巻,第 12 号 (1997)
- [34] 馬淵久夫編集:“元素の事典”、朝倉書店 (1994)
- [35] 旧文部省国立天文台編:“理科年表 平成 13 年”、第 74 冊、丸善株式会社、平成 12 年 11 月 30 日発行
- [36] M.Ozawa, M.Ishida, Y.Sano, Strategic Separation of Technetium and Rare Metal Fission-Products in Spent Nuclear Fuel -Solvent Extraction Behavior and Partitioning by Catalytic Electrolytic Extraction, Extended Synopses of The Third Russian-Japanese Seminar on Technetium,

pp82-85, Dubna, Russia (2002).

- [37] 勝山哲雄他：“多層構造ルテニウム錯体系膜の可視光増感作用を用いる水の光分解”、日本エネルギー学会誌、第79巻、第3号(2000)
- [38] 秋鹿研一：“80年の眠りを覚ます新世代アンモニア合成プロセス”、ペテロテック vol.17 No.2、石油学会(1994)
- [39] 秋鹿研一：“アンモニア合成用ルテニウム触媒における担体及び促進剤効果”、触媒 vol.38 No.4、触媒学会(1996)
- [40] 秋鹿研一：“アンモニア合成用反応触媒研究の最近の進歩”、触媒 vol.40 No.8、触媒学会(1998)
- [41] R.B.Strait, Ian Welch: "First Two 1,850 MTPD Grassroots Ammonia Plants", AMMONIA TECHNICAL MANUAL(2000)
- [42] 日本化学会編：“化学便覧 応用編”、改訂3版、丸善(1980)
- [43] I.Rossetti etc."EFFECT OF Ru LOADING ON Ru/C CATALYST FOR AMMONIA SYNTHESIS", 17th North American Catalysis Society Meeting Totonto, Ontario, Canada 2-3 Oct.2000
- [44] Villesca J., Bala V., Garcia A.: "Reactor Project: Ammonia Synthesis", Rice University Chemical Engineering Department (1997)