



## 核融合炉の遮蔽部発熱を利用した高効率水素製造

岡野 邦彦, 朝岡 善幸, 日渡 良爾, 吉田 智朗  
(電力中央研究所)

### Efficient Hydrogen Production Using Heat in Neutron Shield of Fusion Reactor

OKANO Kunihiko, ASAOKA Yoshiyuki, HIWATARI Ryouji and YOSHIDA Tomoaki  
*Central Research Institute of Electric Power Industry, Komae 201-8511, Japan*  
(Received 13 October 2000/ Accepted 1 April 2001)

#### Abstract

In future perspective of energy supply, a hydrogen energy cycle is expected to play an important role as a CO<sub>2</sub> free fuel for mobile or co-generation systems. Fusion power plants should offer advantages, compatibilities and/or synergistic effects with or in such future energy systems. In this paper, a comprehensive power station, in which a fusion plant is integrated with a hydrogen production plant, is proposed. A tenuous heat source in the outboard shield, which is unsuitable to produce high-pressure and high-temperature steam for efficient electric power generation, is used for the hydrogen production. This integrated system provides some synergistic effects and it would be advantageous over any independent use of each plant.

#### Keywords:

hydrogen production, electrical decomposition, Gibbs free energy, tokamak, neutron shield, fusion reactor, power plant

### 1. はじめに

将来の二次エネルギー供給システムの全体像を考えると、エネルギー輸送・貯蔵媒体である水素が移動用や分散エネルギー源のCO<sub>2</sub>を出さない燃料として重要になる可能性が指摘されている。実際、すでに水素を燃料とする自動車用燃料電池は市販化が近いといわれており、量産化によってコストが大きく下がれば分散電源やコジェネ用として燃料電池が急速に普及することも期待されている。分散電源が普及してもその基盤を支える電力網が不要になるとは思えないにしても、核融合が将来の基幹エネルギー源としての大きな役割を担うためには、これら分散電源のニーズに対しての水素供給源としての寄与が可能であるかどうかは大きなポイントのひとつかもしれない。しかし、その水素製造にあたっては、単純に水

を電気分解するというのであれば他の大型電源となんら違いはない。したがって、もしそのような水素製造に関して核融合炉に備わる性質に有利な可能性が見出せるならば、それをめざして開発を進めるべきであろう。

筆者らは、そのひとつの可能性として、高経済性核融合炉 CREST (電気出力116万 kW) [1] を中心に高効率水素製造プラントを統合した総合エネルギー製造基地「Hydrogenesis Power Station」を第三回核融合エネルギー連合講演会において提案した[2]。本稿ではその検討を詳細化し発展させた結果を報告する。我々の解析によれば、核融合炉と水素製造プラントを結合することは、それぞれを単独に運用するより優れた相乗的効果を発揮することを示すことができる。

author's e-mail: okano-k@criepi.denken.or.jp

## 2. 水の電気分解による水素製造

核融合による水素製造を論じる前に、水の電気分解による水素製造について簡単に述べる。水を分解して水素と酸素に分けるために要するエネルギーは、水のもつエンタルピーと、それが分解して水素ガスと酸素ガスになった状態でのエンタルピーとの差に等しい。そのエンタルピー変化  $\Delta H$  は、

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (T\Delta S = \Delta Q) \quad (1)$$

のように2項に分けて書ける。(1)式の第一項  $\Delta G$  は、ギブスの自由エネルギーの変化であり、この分は電気エネルギーなどの熱でない形で与えなければならない。これに対して、第2項  $T\Delta S (= \Delta Q)$  は反応における熱エネルギーの変化を表している。 $S$  は水の持つエントロピー(温度と状態に依存)で、 $\Delta S$  は元の水(液体)の状態のエントロピーと、水素ガスと酸素ガスに分解した時の系のエントロピーとの差にあたる。この  $\Delta Q$  分は電力でなく熱によって供給することが可能である。Fig.1に示すように、 $\Delta G$  と  $\Delta Q$  の和は反応温度によってそれほど大きくは変わらないが、その比率は変化する[3]。熱だけで水をすべて分解しようとするならば、 $\Delta G$  をゼロにせねばならず、図からわかるように3,000 K以上もの温度が必要になる。しかし、そこまで高温でなくても反応槽の温度を十分に高く維持できれば、 $\Delta Q$  の割合を大きくできることがわかる。発電の効率は高々40-50%なのであるから、水を電解するにあたっては、なるべく電気を節約し、熱のままエネルギーを供給できた方が総合効率を上げることができる。また、通常温度の電解では電解時に必然的に発生するジュール熱が  $\Delta Q$  を超えてしまって、その超えた分はロスとなるが、高温電解では発熱のほとんどを  $\Delta Q$  の一部として使える可能性がある。このような観点から研究が進められている効率的な水素製造法が「高温水蒸気電解法」と呼ばれるもので、反応槽を高温で運転し、エネルギーの一部を熱で供給することで通常の電気分解よりも総合効率を高めることができるとされる。加えて、もし熱エネルギーを発電には有効に使えない廃熱から与えて、少なくとも水の気化潜熱分や酸素+水素と水の熱容量の差の分をこの熱で供給できれば、総合効率としてはさらに有利である。温度は高いほどよいが、材料との兼ね合いもあり、一般的には1,000℃前後での水蒸気電解を考えるのが普通である。なお、以下の設計では高温水蒸気電解法の採用を前提とするが、この水素製造技術は現在開発中であって、実用化に

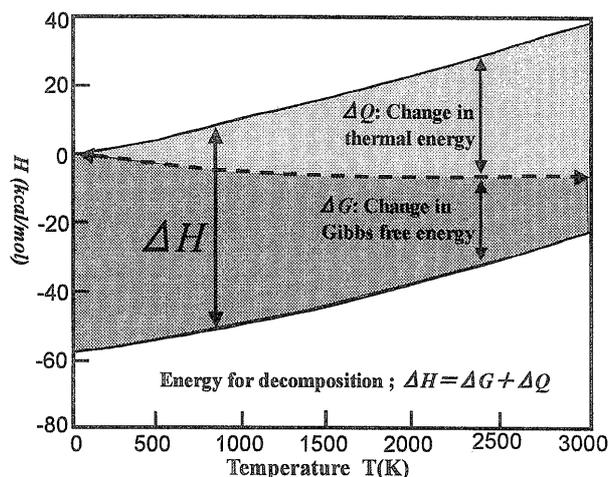


Fig. 1 Decomposition energy of water.

は至っていないことには注意されたい。しかし、今後の燃料電池の発展に伴って電極材などの開発も進むと思われる。核融合の実現までには高温水蒸気電解が実用化しているものと期待することができるだろう。少なくとも、核融合炉より困難な技術とは思われぬ。なお、高温水蒸気電解に関する最近の研究については文献[8]を参照されたい。

## 3. 遮蔽部発熱を利用した水素製造

水素製造も含めた様々な熱利用に関連する核融合炉の特長は、そのブランケット交換機能にあると言える[4,5]。核融合炉は、材料の中性子損傷の観点から、数年に1回程度はプラズマに対向した増殖ブランケットを交換しなければならない。これはコストと稼働率に関してはデメリットとなる可能性もあるが、同時に、ブランケット構造を容易に変更可能であり、数年に1回、特段のコスト増なく最新の技術を投入することも意味する。これは電力以外の様々なエネルギー形態の提供が必要になる場合にはメリットとできることが指摘されている[5]。すなわち、核融合炉は、建設時には電力供給専用として設定されていても、その後のニーズの変化に対応して臨機応変に様々なエネルギーを提供できる可能性がある。したがって、核融合炉は極力そのブランケット構造にフレキシビリティを与える構造とし、それをうまく利用する方向を追求していくべきであろう。

このような観点から、核融合炉による水素製造を見直した結果、筆者らは、その外側遮蔽部の発熱に注目した。Fig.2は核融合概念炉CRESTの断面を示している。CRESTの設計では、トロイダルコイル(14本)の大型化

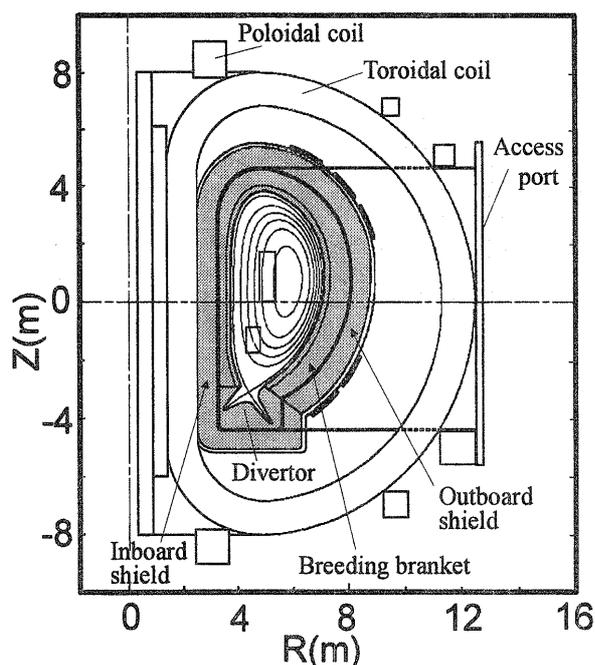


Fig. 2 Vertical view of CREST tokamak.

やポロイダルコイルの配置上の工夫により、トロイダル方向に14分割された各増殖ブランケットが、トロイダルコイルの間に設置した大型ポートから Outboard 側遮蔽部と一体で全部引き抜ける構造になっている、メンテナンスの簡易化、高速化を試みている。照射損傷の観点から交換するのは増殖ブランケット部だけで、遮蔽部は原則的に再利用するが、Outboard 側遮蔽部は Inboard 側遮蔽部に比べ空間的に余裕があることから、この部分に新しい機能を組み込むことは難しくない。また、仮に材料などの変更によって単位厚さあたりの遮蔽性能が低下したとしても、遮蔽厚みを増加する余地も十分にある。

CREST の設計計算を例として考えると、この Outboard 側遮蔽部では核融合中性子出力全体の 3% の発熱がある。しかしながら、その発熱密度が増殖ブランケット領域に比較して非常に低いことから、遮蔽部は高温高圧蒸気の生成には向かず、従来の CREST の設計ではこの部分の発熱は低温廃熱として取り扱うべきものと考え、その利用も例えば冷却材の予熱に利用する程度しか考えていなかった(過熱蒸気サイクルを採用した CREST の発電システムには、480°C、150気圧の蒸気が必要[1])。本研究では、この Outboard 側遮蔽部に純水を供給し、その廃熱で水蒸気電解に必要な蒸気を得ることを考えた。これは本来は発電に使えない遮蔽廃熱の有効な利用法になりうる。Outboard 側遮蔽部の発熱量は核融合炉全体

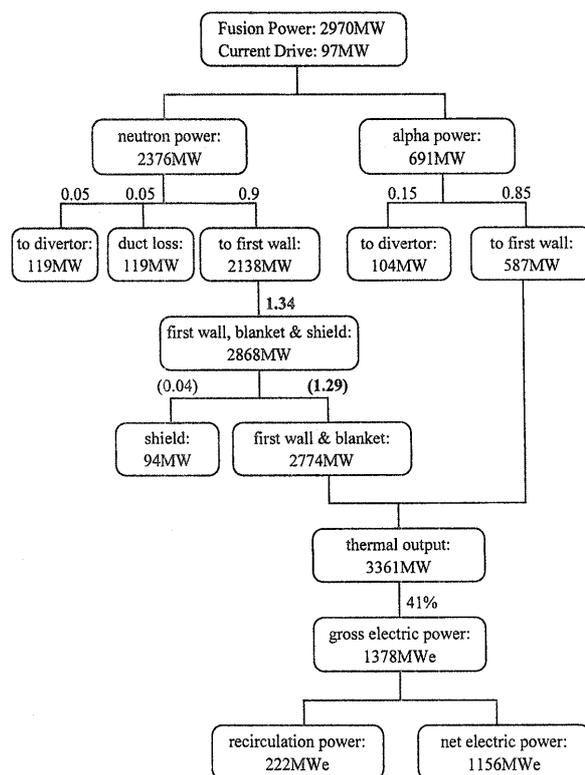


Fig. 3 Overall thermal balance in CREST.

としては決して大きくはないが(ここで取り上げる CREST では上記のように中性子出力の 3%)、水の電気分解をより効率よく進めるための水蒸気供給だけを考えるなら、必ずしも少ないとはいえない熱量であることを示すことができる(次節参照)。もちろん 3% というのはここで取り上げる CREST の設計例であり、設計によっては変更可能であるが、発電に利用できる熱を減らさずに廃熱だけを利用するなら、その熱量は CREST の例が典型的であろう。また、構造を工夫して、Inboard 側遮蔽やダイバータの廃熱も利用すれば、全発電量を投入しても電解しきれないほどの水蒸気を生成可能であることも次節で示される。それゆえ発電量を減らして積極的に電解用蒸気のための熱量を増やすよりは、これらの廃熱をうまく利用の方が現実的であろう。

なお、遮蔽部は、増殖ブランケット内部のトリチウムと完全に切り離されていることに加え、この純水は、内部を繰り返し循環する冷却水などと異なり、遮蔽部を基本的には 1 回通過するのみであることから、生成蒸気へのトリチウムの混入、蓄積の問題も、発電用の循環冷却水に比べれば軽減されていると考えられる。

Fig. 3 には、CREST の熱設計の概要を示す。核融合中性子出力は 2,376 MW で、そのうち全遮蔽部 (Shield) で

はその約4%, 94 MWが発熱する[6]. ただし, この94 MWには中性子照射による核発熱の寄与も含まれている. Outboard側遮蔽ではそのうち66 MWが発生するが, 放射損失などですべては利用できないであろうから, 電解用蒸気生成にはその約60% (42 MW) が利用できるとして以下の設計は進めてある. なお, この熱は従来は廃熱として扱っていたのであるから, それを利用してもCRESTの電気出力にはまったく影響を及ぼさないことには注意されたい.

核融合炉の熱を利用して水素製造を行うアイデアは新しいものではなく, 例えば最近のSheffieldらの総合報告[7]では, 高温ヘリウムまたは液体リチウム冷却の核融合炉からの熱と電力を利用した高温水蒸気電解による水素製造が提案されている. これに対し, 本案は発電用の冷却材とは別に用意した給水系で核融合炉の遮蔽部から蒸気を直接取り出す点と, 発電用の貴重な高温高圧蒸気を使わず, 遮蔽廃熱を利用する点を特徴としている. また, この方式なら加圧水あるいは過熱/超臨界蒸気冷却の核融合炉にも適用可能であり, 設計上の自由度が大きい.

以下には2つの設計例を示す. 第一は, 比較的低温度の蒸気を遮蔽内で生成する案で, 技術的には比較的容易に達成できる. 第二は, 遮蔽廃熱の熱源が温度設定が比較的自由的な核発熱であるという特徴を生かし, 遮蔽内で1,000°C近い高温蒸気を作ること考えたもので, 技術的困難はかなり大きいと思われるが, 核融合炉の特徴をうまく生かした設計といえるものになる.

### 3.1 低温蒸気供給の場合 (130°Cケース)

まずはじめは, 遮蔽部では水の気化潜熱分程度だけを供給するにとどめ, 百数十度の蒸気をできるだけ多く生成して, 可能な限り多くの水素を製造する場合を考えてみる. ただし, この場合も蒸気は電解時のジュール熱を利用して1,000°C前後まで加熱してから高温水蒸気電解を行うことになる. それでも, 常温水を気化させるまでの熱量は大きいので, 遮蔽部で供給する熱は常温水を1,000°Cの蒸気まで加熱するための熱量の半分程度を占めることには留意されたい. このような設計では, 遮蔽部での蒸気温度は低いことから, 照射脆化による低温側の材料制約に注意する必要があるが, 遮蔽部は照射量も少なく, また, 材料温度は蒸気より高くできるので, 高温高圧の発電用冷却水を取り扱うブランケットに比べれば材料的な困難はかなり軽減されると考えられる.

#### システムの概要

Fig. 4は全体システムの概念図, Fig. 5は水素製造シ

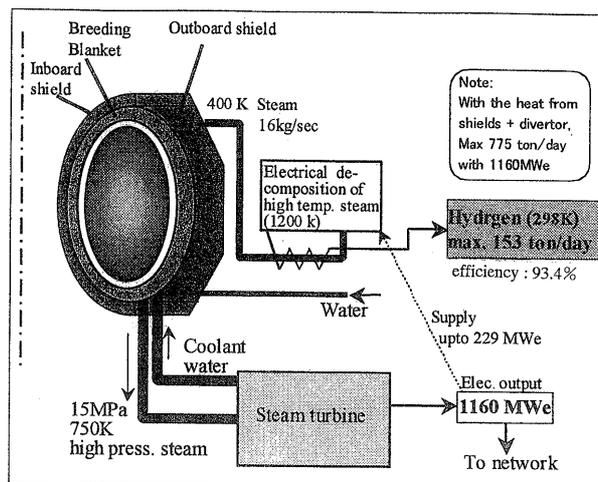


Fig. 4 Schematic drawing of Hydrogen production by CREST (130°C case).

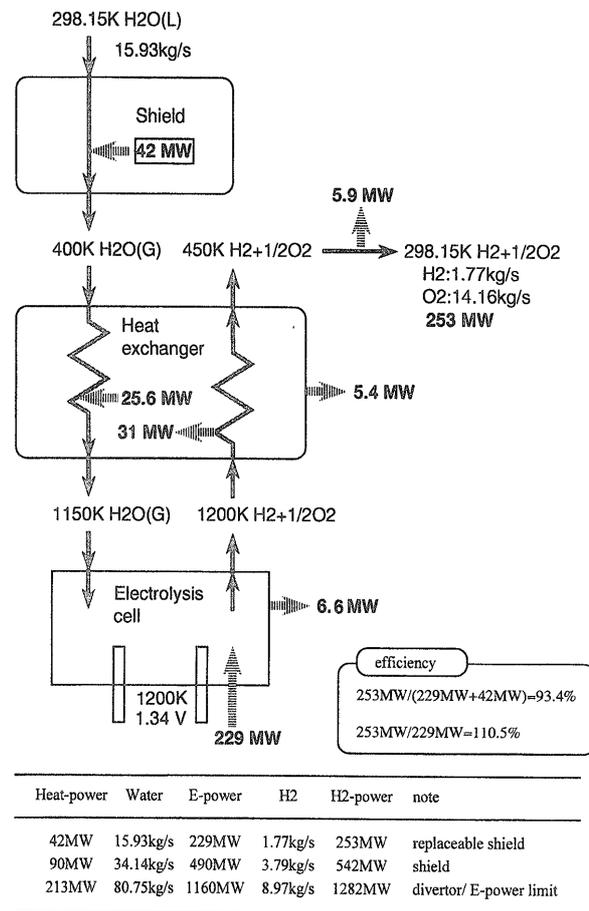


Fig. 5 Thermal balance in Hydrogen production (130°C case).

テムの熱バランスの計算結果を示している. Outboard遮蔽部 (Shield) に25°Cの純水を供給し, 遮蔽内部で熱 (42 MW) を供給することで, 約130°C (400 K) の蒸気が

生成される。水の流量  $L$  は、15.93 kg/s (885 mol/s) である。この蒸気は続いて、熱交換器に入る。電解部で生成される水素と酸素は電解槽の温度と同じ約 930°C (1,200 K) で電解槽を出るから、この熱を使って蒸気をさらに加熱し、約 880°C (1,150 K) にして電解槽に導入する。一方、水素と酸素は、約 180°C (450 K) になって熱交換器をでて、さらに冷却器で 5.9 MW の熱を捨てて常温気体の製品となる。なお、各ステージでの熱損失も考慮しているが、その損失率は現状では詳細な設計に基づく数字ではない。

電解槽に入った蒸気 (880°C) は、水素製造に伴う吸熱 ( $\Delta Q$ ) を上回るジュール熱で温度はさらに上昇し、約 930°C を維持しつつ電解される。電解槽に供給される水蒸気量は  $L$  に等しく毎秒 15.93 kg で、そこからできる水素量は、毎秒 1.77 kg、すなわち、153トン/日になる。必要な電力は、229 MW であるので CREST の発生電力の 20% を水素製造に投入することになる。投入した熱量 (42 MW) と電力の水素へのエネルギー変換効率を評価すると、93.4% という高い効率を得る。通常のアルカリ水電解法では 80% 程度とされるから、これは非常に高効率である。さらに遮蔽からの廃熱で供給した分を無視し、電力だけで効率を評価すれば、水素へのエネルギー変換効率は 110.5% に達している。なお、ここでいうエネルギー変換効率とは、

$$\left[ \text{水素が燃焼して水になるときに出す熱量} \right] / \left[ \text{電解に投入した電気エネルギー (+ 廃熱分)} \right]$$

で計算されるものである (注: 反応生成物が水蒸気か水かで発生可能熱量は異なる)。なお、発電における熱電気変換効率は考慮されていない。これは、本論文は水電解装置を核融合炉と併設したときと遠方で電解したときの差を比較することを目的とするからである。電解を利用しない熱分解法での水素製造とのエネルギー変換効率の比較には、「発電熱効率 × 上記のエネルギー変換効率」を用いねばならない。一例であるが、高温ガス炉用の高温水蒸気電解よりも実用化に近い技術として開発が進んでいる熱化学分解法 (IS プロセス) による水素製造においては、将来の実用化時に達成可能な総合熱効率は「30% 以上」とされている [8]。一方、高温水蒸気電解の基礎的試験においては、発電効率を含めない見かけのエネルギー変換効率は、様々なロスによって 90% 程度にとどまっているものの [8]、今後の開発によっては 100% を超えることは可能と考えられている。すなわち、核融合に

おいてその発電効率が 40% 前後にできた場合には、本稿で提案する廃熱を利用した電解法による水素製造の総合効率が 40% を超えることもありうるので、核融合用の水素製造法としては効率でも電解法の方が有利となる可能性はある (CREST 炉の 480°C 過熱蒸気システムでは 41% の発電効率が可能とされている [1])。

常温水 (298.15 K) を常温水素 + 常温酸素に変換するまでのエンタルピー変化とその変化に必要なパワーを Table 1(a) にまとめている。ここでエンタルピーは最後の状態を 0 として記述した。これからわかるように、1 モルあたりの水素製造に必要な総エンタルピー変化 (285.83 kJ/mol) のうち 17% にあたる 47.45 kJ/mol を遮蔽部廃熱で与えており、これが総合効率の向上に貢献している。

この 130°C ケースでは、電解槽の温度 (1,200 K = 930°C) に対応する理論電解電圧 0.941 V に対して、1.34 V の電圧を加えて電解するとした。この差を過電圧と呼ぶ。現実の電解ではある程度の過電圧が必ず必要であるが、ここで仮定した 0.4 V 程度の過電圧は十分に実現可能と思われる範囲である。

#### 水素製造量の検討

このシステムが製造する 153トン/日という水素量が十分かどうかについて考える目安として、例えば、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) を中心に進んでいるプロジェクト; ニューサンシャイン計画の一環として検討された「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) [9]」で設定されたプラントと

Table 1 Power balance in Hydrogen production system, a) 130°C case, b) 1,000°C case.

a) 130°C case	Enthalpy H (kJ/mol)	$\Delta H$ (kJ/mol)	Power [= $\Delta H L$ ] (MW)
298.15K H <sub>2</sub> O (liquid)	-285.83		
400.00K H <sub>2</sub> O (gas)	-238.38	47.45	42.00
1150.0K H <sub>2</sub> O (gas)	-209.48	28.90	25.57
1200.0K H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> (gas)	41.678	251.16	222.29
450.0K H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> (gas)	6.798	-34.88	-30.96
298.15K H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> (gas)	0	-6.798	-5.93

L=885 mol/s

b) 1000°C case	Enthalpy H (kJ/mol)	$\Delta H$ (kJ/mol)	Power [= $\Delta H L$ ] (MW)
298.15K H <sub>2</sub> O (liquid)	-285.83		L1 L2
400.00K H <sub>2</sub> O (gas)	-238.38	47.45	21.95 ↓
1300.0K H <sub>2</sub> O (gas)	-202.89	35.49	16.43 25.54
1100.0K H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> (gas)	36.825	239.72	184.83
350.0K H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> (gas)	2.276	-34.55	-26.64
298.15K H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> (gas)	0	2.276	-1.75

L<sub>1</sub>=463 mol/s, L<sub>2</sub>=308 mol/s, L=771 mol/s

比較してみよう。WE-NETは海外ですべての水素を作って日本に送る計画である。このなかで設定された水素製造専用プラント一基の定格は300トン/日である。すなわち、CRESTによる153トン/日の製造量は、発電と平行して製造できる水素量としては決して小さくはない。

水素のニーズが増し、さらに大きな水素製造量を必要とした場合の対応についても検討した。Fig. 5の下段に示した表のうち、下の2行は、Inboard側を含めた全シールドの熱を利用できた場合(中段)、さらにダイバータの排熱もその一部が利用できた場合(下段)、の2通りを示す。前者の場合、490 MWの電力を投入すれば、327トン/日(3.79 kg/s)の水素が製造可能。後者のケースでは、水蒸気量よりもCRESTの電気出力が制約となり、全発電電力1,160 MWを投入して、775トン/日(8.97 kg/s)の水素製造が可能となる。直接プラズマに対向するダイバータからの水蒸気にはトリチウムが混入する可能性を否定できないので、熱交換器を介する必要があるかもしれない。その分のロスが生じるが、熱量としてはダイバータの総排熱(223 MW)のうち、約半分の123 MWが利用できれば十分である。なお、いずれの場合も、利用可能な熱量に比例して流量 $L$ を増やしているだけなので、エネルギー変換効率は前述のOutboard側遮蔽部のみ利用の場合とまったく同じである。

### 3.2 高温蒸気供給によるさらに先進的設計の場合(1,000°Cケース)

前節で述べた設計例は、電解槽温度は1,000°Cの高温ながら、核融合炉の内部では高温蒸気を作らないことから、技術的には大きな無理はなく、核融合炉が実現した時点ですぐに適用できるものであろう。発電には利用できない遮蔽部廃熱であっても、水の沸点をわずかでも超える熱であれば電解による水素製造のアシストには有効に使えることを示したという観点での意義があるし、現実的な選択かもしれない。しかし、130°Cの蒸気を作るのでは「核融合ならでは」の熱利用ということではできないようにも思われる。遮蔽部からの廃熱などをうまく利用してはいるが、それは、そもそも核融合炉がそのような発電に利用しにくい熱を発生してしまうシステムであることを逆に示しているともいえる。そこで、技術的、材料的にはさらにチャレンジングなものとはなるが、遮蔽部から低圧ながらも高温で蒸気を取り出すことを考えてみる。

遮蔽部での発熱は中性子による直接発熱であることは注目に値する。すなわち、総熱量は少ないにしても、遮蔽部の冷却法と構造の工夫しだいで、それを低圧(数気

圧)ながらも高温で取り出すことなら可能かもしれないのである。熱伝導で加熱されているのではなく核的內部発熱だから、遮蔽部が増殖ブランケットよりも外に位置しているにもかかわらず、そこから取り出し可能な温度は増殖ブランケット部の温度より高くなることもありうる。高温を取り出すには、材料をそれなりの耐高温材に変更する必要があるが、Outboard側遮蔽部なら空間的な制約が少ないことと遮蔽部の中性子負荷は大きくないことから、実現への材料上の困難は増殖ブランケットに比べれば軽減されると期待もできる。ただし、ここでは材料の問題は別として、仮に1,000°Cの蒸気を取り出せる場合の熱バランスと、それによる水素製造効率の向上について考えることにする。

Fig. 6, 7にそのコンセプトと熱バランスの計算結果を示した。純水は2通りのルートで遮蔽部に供給される。Fig. 7の上から入るパスでは、まず、常温(25°C)の水が流量 $L_1=8.33$  kg/s (463 mol/s)で熱交換器に入り、そこで製品の水素+酸素(830°C=1,100 K)の熱によって気化し130°C(400 K)の蒸気にまで予熱される。次にOutboard側遮蔽部(Shield)に入り、1,030°C(1,300 K)まで加熱される。もうひとつの純水のパスは、Fig. 7の右中央から遮蔽部に入るパスで、純水(流量 $L_2=5.55$  kg/s=308 mol/s)は遮蔽部の中で気化して、やはり1,030°C(1,300 K)にまで加熱される。

両パスの蒸気は混合され、合計流量 $L=13.88$  kg/s (771 mol/s)の蒸気が電解槽に入る。電解電圧は1.27 Vとした。この温度での理論電解電圧は0.970 Vである。ジュール加熱を減らすために過電圧は前節の130°Cケースより低い0.30 Vに設定してあるので、この点でもよりチャレンジングな設計である。

製品の水素と酸素は、先に述べたとおり、熱交換器にて純水を加熱した後、1.8 MWの熱を冷却器で捨てて、常温気体の製品となる。必要な電力は189 MW、水素製造量は1.54 kg/s、すなわち133トン/日である。130°Cケースの153トン/日には及ばないが、大規模水素製造プラントとしても十分な製造量といえる。エネルギー変換効率は、熱と電力の総合効率で95.3%、電力のみで評価すれば、見かけの電力効率は116.6%に達する。130°Cケースと比べると、総合効率では約2%、見かけの電力効率では約6%の効率向上になっている。

システム全体のエンタルピー変化をTable 1(b)に示す。1,000°Cケースでは水のパスが2本あるので複雑だが、流量 $L_1$ のパス(熱交換器で130°Cまで予熱後遮蔽部に入る)は水素製造に必要な総エンタルピー変化の12%程度、流

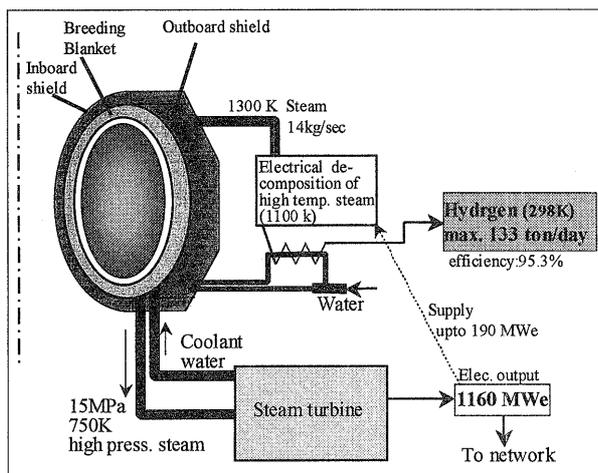


Fig. 6 Schematic drawing of Hydrogen production by CREST (1,000°C case).

Table 2 Hydrogen production by CREST.

Design Concept	130°C case			1000°C case
	thermal power source→ outboard shield	all shields	w/divertor	outboard shield
elec. power to cell (MW)	229	490	1160	189
thermal power to cell (MW)	42	90	213	42
steam temp. in shield(s) (°C)	130	←	←	1030
operation temp. in cell (°C)	930	←	←	830
max. H <sub>2</sub> production (Ton/day)	153	327	775	133
efficiency	over all effective	93.4% 110.5%	← ←	95.3% 116.6%
NOTES	low temp. and max. H <sub>2</sub> production conservative design concept			high efficiency challenging design

\* Net output of CREST is 1160 MWe

の材質を、低圧ではあるが1,000°C前後の高温蒸気に耐える材料に変更する必要がある。この材料の検討は今後の課題であり、現状では適切な材料を示すことはできない。また、その断熱についても技術的課題がある。すなわち、遮蔽内で1,000°C蒸気を直接作るというのは、もっとも極端な理想ケースを調べたわけであって、130°C以上1,000°C以下の範囲の可能な限り高い温度にできれば、それに応じて、1,000°Cケースを上限に効率改善できるといえる。

なお、Fig. 7下段の表には全遮蔽部の熱(90 MW)を利用した場合も示してあり、その場合は約2倍の水素製造量となるが、空間的に余裕のないInboard側遮蔽では、材料や構造を変更するのは設計上容易でないと考えられる。また、冷却条件が厳しいダイバークから1,000°C前後の高温蒸気を取り出すのは技術的にはさらに難しいだろう。

上記2ケース(130°Cケースと1,000°Cケース)の水素製造のパラメータをTable 2にまとめた。

最後に、このような熱の取り出しに要するコストであるが、130°Cケースでは、元来、遮蔽部も冷却は必須であるから新たに冷却系を追加するというわけではない。大きな構造変更は必要ないであろう。もちろん、電解セルなどのシステムコストは必要である。一方、1,000°Cケースでは遮蔽部の材質から変更せねばならないが、その分のコストは未知である。1,000°Cケースではエネルギー変換効率が130°Cケースより6%ほど上昇するが、(110.5%→116.6%)、構造変更によるコスト差がこの効率差によるコストの違いを下回るかどうかを十分検討する必要がある。

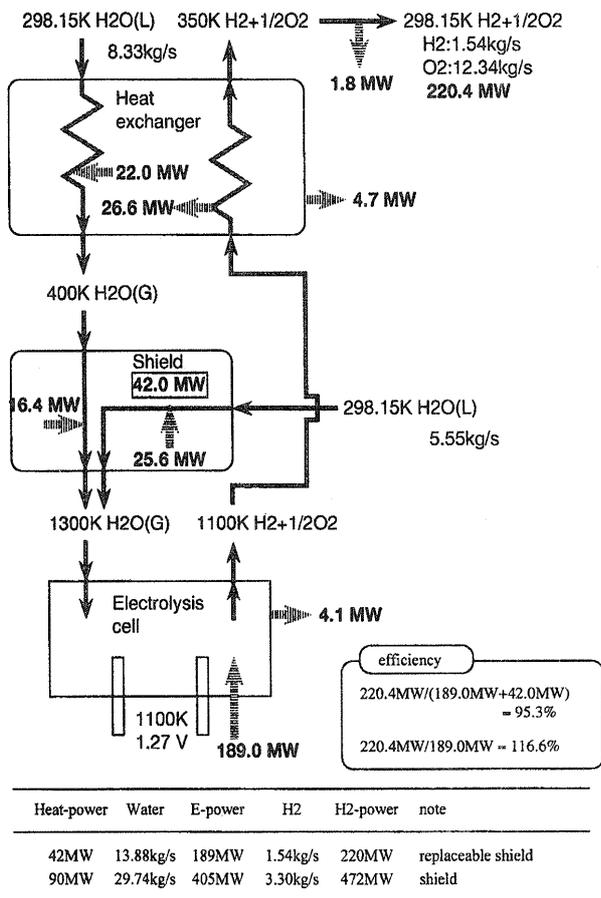


Fig. 7 Thermal balance in Hydrogen production (1,000°C case).

量  $L_2$  のパス(常温で遮蔽部に入る)は同29%程度を遮蔽廃熱から獲得している。

先に述べたように、このケースでは、Outboard側遮蔽

#### 4. システム統合による効果

以上で述べたシステム(Hydrogenesis Power Station; HPS)について、核融合と水素製造を統合したことによって有利となる点を考える。未来エネルギーシステム

の中でのメリットを考える場合、核融合炉の視点だけから効果を捕らえるのは適切でないので、視点別に考えてみることにする。

#### 水素製造の観点から

核融合炉の廃熱を利用して電解用の蒸気を供給できれば、投入電力から計算した見掛け効率が110%を超える高効率な水素製造システムを構築できる。例えば、通常のアルカリ水電気分解法で水素を製造しようと考えれば、エネルギー変換効率は80%程度、あるいは水素製造に現在開発が進む固体高分子電解質電解法 (PEM法) の採用を仮定すると、エネルギー変換効率として90%程度が期待できるといわれる [9, 10]。したがって、水素製造プラントを核融合炉に併設することは効率で20%以上有利になる可能性がある。

#### 核融合プラントの観点から

核融合プラントとしても、余剰電力を水素製造に回せることで送電端電力の負荷追従性が向上するうえ、廃熱利用によってエネルギーを有効に利用していることにもなる。炉心プラズマの核融合出力を下げることで負荷に追従することも不可能ではないが、プラズマは定常に維持するほうが望ましいし、水素製造で調整するほうがはるかに単純で、負荷変動への速やかな応答も可能である。水素製造量は電力ニーズに左右されることになるが、貯蔵が難しい電力と異なり平均で目標水素製造量を維持できていれば問題は生じないだろう。

### 5. 結 辞

核的発熱である核融合遮蔽廃熱は、廃熱ながらもその温度設定が比較的自由であるという一般の廃熱にはない特徴がある。これを利用した水素製造法の可能性を検討し、発電と平行に分散電源向けの水素製造が可能な将来の総合エネルギー基地として、その中心に電気出力116万kWの核融合炉を据えた概念案「Hydrogenesis Power Station (HPS)」を示した。核融合発電プラントと水素製造プラントを統合した場合、いずれのプラントの単独運用と比べても優れた相乗的効果を発揮し、将来ニーズに応える核融合の応用として一つの方向といえる。ブランケットで130℃の蒸気を生成するケースで、見かけのエネルギー変換効率110.5% (廃熱分を無視し投入電力だけで計算した効率) で153トン/日の水素が電力と平行に製造可能であるが、もし水素が大量に必要とされる時代になれば、HPSは核融合による全発電電力と遮蔽+ダイバータの廃熱とを水素製造に投入することで、最大で775トン/日という大規模な水素製造基地へと発展する

こともできることが示された。また、技術的に解決すべき問題も多いものの、仮に1,000℃の蒸気をOutboard側遮蔽部で生成可能ならば、見かけのエネルギー変換効率として116%が達成できることも示された。このような新しい方向性を追求していくことは、未来エネルギーシステムの中で核融合炉をフレキシビリティに富んだシステムとして位置づけていくために重要である。

### 謝 辞

本案の合理性などに多くの貴重なコメントをいただいた電力中央研究所の苦米地 顕氏、水素製造やエネルギーシステムに関しての議論とアドバイスをいただいた日本原子力研究所の小西哲之氏、東京大学の小川雄一氏、地球環境産業技術研究機構 (RITE) の時松宏治氏には、そのご協力に深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

- [1] K. Okano, Y. Asaoka, T. Yoshida *et al.*, Nucl. Fusion **40**, Yokohama Special Issue 3, p.635 (2000), or Fusion Energy 1998 (17th IAEA Int. Conf., Yokohama, 1998) FTP-11.
- [2] 岡野邦彦, 朝岡善幸, 日渡良爾, 吉田智朗: 高効率水素製造が可能な核融合発電プラント概念, 第3回核融合エネルギー連合講演会 (中部大学), C24, 2000年6月.
- [3] P.E. Chao, "Thermochemical Water Decomposition Process", I & EC Product Research & Development **13**, 74 (1974). 関連した平易な解説としては例えば [10].
- [4] 小西哲之 他: 核融合炉の熱利用, 第3回核融合エネルギー連合講演会 (中部大学), C16, 2000年6月.
- [5] 核融合会議, 核融合開発戦略検討分科会報告書, 2000年5月, 科学技術庁.
- [6] Y. Asaoka *et al.*, *The 13th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy*, Nashville, USA (1998).
- [7] J. Sheffield, W. Brown, G. Garrett, J. Hilley, D. McCloud, J. Ogden, T. Shields and L. Waganer, JIEE 2000-06, June 2000, Joint Institute for Energy and Environment, Knoxville, USA.
- [8] 日野竜太郎, 鈴木邦彦, 羽賀勝洋 他: HENDELによるHTTR熱利用形系炉外実証試験の検討, JAERI Review 95-016, 1995年, 日本原子力研究所.
- [9] WE-NET サブタスク1, 平成8年度成果報告書, NEDO, 1997年.
- [10] 太田時男: 水素エネルギー (森北出版株式会社, 1987年).