

## 高温ガス炉ISプロセス水素製造システムの 経済性評価

Economic Evaluation of HTGR IS Process Hydrogen Production System

岩月 仁 笠原 清司 久保 真治 稲垣 嘉之  
國富 一彦 小川 益郎

Jin IWATSUKI, Seiji KASAHARA, Shinji KUBO, Yoshiyuki INAGAKI  
Kazuhiko KUNITOMI and Masuro OGAWA

原子力科学研究部門  
原子力水素・熱利用研究センター  
水素利用研究開発ユニット

Hydrogen Application Research and Development Unit  
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center  
Sector of Nuclear Science Research

September 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

## 高温ガス炉 IS プロセス水素製造システムの経済性評価

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力水素・熱利用研究センター  
水素利用研究開発ユニット

岩月 仁、笠原 清司、久保 真治、稲垣 嘉之、國富 一彦<sup>+1</sup>、小川 益郎<sup>+1</sup>

(2014年8月12日 受理)

きたるべき低炭素社会へ向けてクリーンなエネルギー媒体である水素の需要増が見込まれており、安定かつ大量に水素を供給できる水素製造技術の速やかな開発が求められている。高温ガス炉の熱エネルギーを用いることにより、水から水素を製造する熱化学法 IS プロセスは、CO<sub>2</sub>を排出することなく、安定かつ大量に水素を生産できうる、将来の最有力水素製造技術の一つとして、水素・燃料電池戦略ロードマップに記載されるなど、大きな期待が寄せられている。今後、実用化に向けた経済性評価が必要だが、将来の商用高温ガス炉 IS プロセス水素製造システムの経済性を精度良く評価することは現段階では困難である。そこで、既存の化石資源を用いた大型商用水素製造プラントの経済性評価データを基に、高温ガス炉 IS プロセス水素製造システムの経済性を評価した。本評価において、水素製造コストは 25.4 円/Nm<sup>3</sup>であり、それに占める水素製造設備の資本費の割合は 13%、エネルギー費が占める割合は 78%であった。よって、エネルギー源である高温ガス炉の建設コストの削減、稼働率の向上、水素製造熱効率の改善が水素製造コストの削減に大きく寄与することがわかった。この水素製造コストは燃料電池自動車 (FCV) 用水素燃料などに求められる水素製造コストを十分満足できることから、この値を高温ガス炉 IS プロセス水素製造システムによる水素製造コストの目標値として研究開発をすすめていく。

## **Economic Evaluation of HTGR IS Process Hydrogen Production System**

Jin IWATSUKI, Seiji KASAHARA, Shinji KUBO,  
Yoshiyuki INAGAKI, Kazuhiko KUNITOMI<sup>+1</sup> and Masuro OGAWA<sup>+1</sup>

Hydrogen Application Research and Development Unit,  
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center,  
Sector of Nuclear Science Research  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 12, 2014)

Stable and large scale hydrogen production technologies are needed for the expecting low carbon society. Thermochemical iodine-sulfur (IS) process is one of the promising technologies, which harnesses heat energy of high temperature gas-cooled reactors (HTGRs). An economic evaluation of hydrogen production by a future commercial HTGR-IS process hydrogen production system was performed on the basis of economic evaluation data of an existing commercial hydrogen production plant using fossil fuel as a raw material. Hydrogen production cost was estimated at 25.4 JPY/Nm<sup>3</sup> under this estimation conditions. Capital cost and energy cost account for 13% and 78% of the total hydrogen production cost, respectively. To decrease HTGR construction cost, to increase HTGR availability and to improve hydrogen production thermal efficiency are important for cost reduction of hydrogen. The cost will be competitive with estimated costs by fossil fuel hydrogen production methods. It is appropriate that the hydrogen production cost is set for a goal of present R&Ds.

Keywords: Economic Evaluation, HTGR, Hydrogen Production, IS Process

---

<sup>+1</sup> Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

目 次

1. 序論	-----	1
2. 水素製造コスト	-----	3
2.1 評価条件	-----	3
2.1.1 資本費	-----	3
2.1.2 運転維持費	-----	4
2.1.3 エネルギー費	-----	4
2.1.4 原料消耗費	-----	5
2.2 評価結果	-----	6
2.2.1 資本費	-----	6
2.2.2 運転維持費	-----	6
2.2.3 エネルギー費	-----	6
2.2.4 原料消耗費	-----	6
2.2.5 水素製造コスト	-----	6
3. 結論	-----	8
参考文献	-----	9

Contents

1. Introduction	-----	1
2. Hydrogen Production Cost	-----	3
2.1 Evaluation Condition	-----	3
2.1.1 Capital Cost	-----	3
2.1.2 Operation Cost	-----	4
2.1.3 Energy Cost	-----	4
2.1.4 Consumables Items Cost	-----	5
2.2 Evaluation Results	-----	6
2.2.1 Capital Cost	-----	6
2.2.2 Operation Cost	-----	6
2.2.3 Energy Cost	-----	6
2.2.4 Consumables Items Cost	-----	6
2.2.5 Hydrogen Production Cost	-----	6
3. Concluding Remarks	-----	8
References	-----	9

This is a blank page.

## 1. 序論

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価の第1～3作業部会報告書<sup>1)</sup>には、

- ・気候システムの温暖化には疑う余地はないこと
- ・人間の影響が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因であった可能性が極めて高いこと（95%以上）
- ・気候変動を抑制するには、温室効果ガス（GHG）排出量の抜本的かつ持続的な削減が必要であること
- ・人為起源のGHG排出による気温上昇を産業革命前に比べて2°C未満に抑えられる可能性が高い（66%以上の確率）緩和シナリオは、2100年に大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）換算濃度が約450ppmとなるものであること（確信度：高い）
- ・2100年に約450ppmに達する大半のシナリオで特徴的なことは、エネルギー効率がより急速に改善され、再生可能エネルギー、原子力エネルギー、並びにCO<sub>2</sub>回収・貯留（CCS）を伴う化石エネルギーまたはCCS付きバイオエネルギーを採用したゼロカーボンおよび低炭素エネルギーの供給比率が2050年までに2010年の3倍から4倍近くになっていること
- ・2030年まで緩和の取り組みを遅延させると、長期的な低排出レベルへの移行が相当困難になり、産業革命前から気温上昇を2°C未満に抑え続けるための選択肢の幅が狭まること（確信度：高い）

などが記載されている。特に、温暖化の緩和策として、2050年までにゼロカーボンおよび低炭素エネルギー供給比率を2010年の3～4倍近くにあげること、しかも、緩和策を2030年まで先送りすれば、2°C未満に気温上昇を抑えることが相当困難になると、明快に記されている。したがって、技術立国を掲げる我が国は、CO<sub>2</sub>を排出したら処分するCCS技術、CO<sub>2</sub>の排出量を減らす高効率化技術、CO<sub>2</sub>を排出しない再生可能エネルギーおよび原子力エネルギー技術、これらすべての技術開発を進めることを世界から期待されている。

六つの第四世代原子力システムの一つである超高温ガス炉（VHTR）は、極めて高い安全性を有すると共に高い経済性を有し、電力分野のみならず、すべて化石燃料によって賄われている熱利用分野に高温の熱を供給できる先進的原子力エネルギーとして世界各国で研究開発が進められている。特に、きたるべき低炭素社会へ向けてクリーンなエネルギー媒体である水素の需要急増が見込まれており、安定かつ大量に水素を供給できる水素製造技術の速やかな開発が求められている。高温の熱と水を用いて水素を製造する超高温ガス炉ISプロセス水素製造システム（VHTR-IS）は、ほとんどCO<sub>2</sub>を排出することなく、安定かつ大量に水素を生産できるため、将来の最有力水素製造技術の一つとして、水素・燃料電池戦略ロードマップに記載<sup>2)</sup>されるなど、大きな期待が寄せられている。

日本原子力研究開発機構（JAEA）では、熱化学法ISプロセス水素製造技術について、これまでに基盤技術となる要素技術を確認してきた。現在は、原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準策定ならびに安全基準に適合する設計対策など基盤技術の確立を行うHTTR接続試験の前段階において、工業用材料機器から成る連続水素製造装置を用いて、技術・信頼性を

確証中である。

今後、その実用化にむけた経済性評価が必要だが、現段階では将来の最適化された大型商用プラントを想定した高精度な経済性評価は困難である。

そこで本報では、既存の化石資源を用いた大型商用水素製造プラントの評価を参考に、将来の高温ガス炉 IS プロセス水素製造システム (HTGR-IS) の経済性を評価し、化石資源を用いた水素製造法との競合可能性、また産業界、一般市場ニーズへの価格適合性の検討を行った結果について報告する。

## 2. 水素製造コスト

### 2.1 評価条件

水素製造コストの構成要素は、資本費、運転維持費、エネルギー費および原料消耗費とした。水素製造コストの算出は、OECDにおいても一般的に採用されており電事連が行った電源別発電コストの試算<sup>3)</sup>と同様の運転年数発電原価方式に準じて行った。

$$\text{水素製造コスト (円/Nm)} = \frac{\text{資本費} + \text{運転維持費} + \text{エネルギー費} + \text{原料消耗費}}{\text{水素製造量}}$$

また、以下を算出の条件として設定した。

- ・熱利用量：600 MW とする。
- ・水素製造プラントの規模：85,400 Nm<sup>3</sup>/h とする。
- ・水素製造効率：50%と想定する。
- ・稼働率：高温ガス炉の稼働率と同等とする。
- ・IS プロセス水素製造システム（IS プラント）への熱および電力は、全て高温ガス炉から供給する。
- ・高温ガス炉のプラント諸元は、JAEAで行った高温ガス炉の経済性評価<sup>4)</sup>に基づく。
- ・原子炉の運転年数は40年とする。化学反応器やプロセス配管など腐食性流体に接する主要機器は10年ごとに更新する。
- ・プラント建設費は習熟効果により設計費が不要と想定する。
- ・技術開発により機器合理化、材料廉価化が達成できると想定する。
- ・土地代、金利は含まないとする。

以下に、コスト構成要素について、評価の考え方および評価条件を示す。

#### 2.1.1 資本費

資本費の内訳は、減価償却費および固定資産税であり、それぞれ毎年かかる費用を現在価値換算し合計したものの総和を資本費とした。

##### (1) 減価償却費

減価償却費は、定額法により求めた。主な条件は次の通りである。

- ① 償却年数：10年（償却率：0.100）
- ② ISプラント建設費

ISプラント建設費は、ISプラントと石油精製水素製造プラントの単位操作の比較より、水素製造量が同規模の石油精製水素製造プラント建設費<sup>5)</sup>の2倍と想定した。石油精製水素製造プラント諸元は次の通りである。

- a. 水素製造量：1,000,000 Nm<sup>3</sup>/day（41,667 Nm<sup>3</sup>/h）
- b. 水素製造プラント建設費：4,741 百万円
- c. PSA 追加改修費：1,256 百万円

石油精製水素製造プラントには、高純度精製装置として PSA (Pressure Swing Adsorption) プロセスを含めた。建設費は石油精製水素製造プラントを基に、スケール効果(0.6 乗則)を考慮し、規模を 85,400 Nm<sup>3</sup>/h まで拡大するとして算出(約 89 億円)し、これを 2 倍して 177 億円とした。建設費の内訳は、Chilton 法<sup>6)</sup>を用いて算出した。

## (2) 固定資産税

固定資産税については、IS プラント建設費に対して、標準的な値である固定資産税率 1.4% を乗じて求めた。

### 2.1.2 運転維持費

運転維持費の内訳は、修繕費、諸費、給料手当および事業報酬であり、それぞれの総和を運転維持費とした。

#### (1) 修繕費

修繕費については、IS プラント建設費に対して、修繕费率 3% (想定) を乗じて求めた。

#### (2) 諸費

諸費については、IS プラント建設費に対して、諸费率 0.6% (想定) を乗じて求めた。

#### (3) 給料手当

給料手当については、年間 840 万円/人と想定し、当直運転員を 3 人/班の構成とし、当直勤務 4 班体制、計 12 人と評価した。

#### (4) 事業報酬

事業報酬については、IS プラント建設費に対して、事業報酬率 2.5% (想定) を乗じて求めた。

### 2.1.3 エネルギー費

エネルギー費の算出は、所要電力、所要熱に対して、発電コスト、熱供給コストを乗じて求めた。発電コストについては、高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTR300) の経済性評価<sup>4)</sup>で報告されている発電単価を、2011 年に報告されている軽水炉のコスト評価<sup>7),8)</sup>を参考にして見直した概略評価値である。発電コストは高温ガス炉の稼働率に応じて増減する値である。熱供給コストについては、高温ガス炉ガスタービン発電システムの発電効率を乗ずることで換算した。

高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTR300) のプラント諸元は次の通りである。

(1) 構成：4 ユニット/プラント

(2) プラント出力： 熱出力 600MWt/ユニット

電力出力約 275MWe/ユニット (グロス)

約 269MWe/ユニット (ネット)

(3) 平均燃焼度： 120GWd/t

(4) 稼働率： 80%

(5) 想定プラント運転年数： 40 年

(6) 発電単価算出時の割引率： 3%

見直した発電コストは、5.8 円/kWh（稼働率 80%）、熱供給コストは、0.7 円/MJ（稼働率 80%、発電効率 45%）であった。

所要電力は、水素製造量が同規模の石油精製水素製造プラントにおける所要電力<sup>5)</sup>を参考に、0.25 kW/h と設定した。所要熱は、水素の高位発熱量と水素製造効率から求めた。

#### 2.1.4 原料消費費

原料消費費については、原料水費、冷却水費および触媒費であり、それぞれの総和を原料消費費とした。

##### (1) 原料水費

原料水費については、所要原料水量は水素製造量から求め、単価は茨城県南広域の工業用水道料金 95 円/m<sup>3</sup><sup>9)</sup>を用いた。

##### (2) 冷却水費

冷却水費については、水素製造量が同規模の石油精製水素製造プラントにおける冷却水費<sup>5)</sup>を参考に、冷却水コスト 0.04 円/kg、冷却水使用量 20,000 kg/h と設定し、それらに乗じて求めた。

##### (3) 触媒費

触媒費については、水素製造量が同規模の石油精製水素製造プラントにおける触媒費<sup>5)</sup>を参考に、年間の消費量を 5,000 万円と設定した。

## 2.2 評価結果

2.1 節に示した評価条件を用いて、将来の高温ガス炉 IS プロセス水素製造システムの資本費、運転維持費、エネルギー費等、これらを合計した水素製造コストを評価した。

### 2.2.1 資本費

熱効率 50%、稼働率 80%の場合には、資本費は 3.4 円/Nm<sup>3</sup>となった。

資本費に対する稼働率と水素製造効率の感度を評価した結果を Table 1 に示す。また参考として、Fig. 1 に Chilton 法<sup>6)</sup>を用い総建設費から算出した IS プラント建設費内訳を示す。稼働率、水素製造効率ともに、高いほど水素製造量が増えるので資本費が安くなり、稼働率 70%、水素製造効率 30%をそれぞれ 90%、50%まで高めると資本費 3.5 円/Nm<sup>3</sup>のコストダウンが見こめる。

### 2.2.2 運転維持費

熱効率 50%、稼働率 80%の場合には、運転維持費は 2.0 円/Nm<sup>3</sup>となった。

運転維持費に対する稼働率と水素製造効率の感度を評価した結果を Table 2 に示す。資本費の場合と同じく、稼働率、水素製造効率ともに、高いほど水素製造量が増えるので運転維持費が安くなり、稼働率 70%、水素製造効率 30%をそれぞれ 90%、50%まで高めると運転維持費 2.0 円/Nm<sup>3</sup>のコストダウンが見こめる。

### 2.2.3 エネルギー費

熱効率 50%、稼働率 80%の場合には、エネルギー費は 19.9 円/Nm<sup>3</sup>となった。エネルギー費に対する稼働率と水素製造効率(水素製造量が変化)の感度を評価した結果を Table 3 に示す。稼働率、水素製造効率ともに、高いほど水素製造量が増えるのでエネルギー費が安くなり、稼働率 70%、水素製造効率 30%をそれぞれ 90%、50%まで高めると 16.7 円/Nm<sup>3</sup>のコストダウンが見こめる。

### 2.2.4 原料消費費

原料消費費は、原料水費 : 0.076 円/Nm<sup>3</sup>、冷却水費 : 0.009 円/Nm<sup>3</sup>、原料水費 : 0.067 円/Nm<sup>3</sup>の総計で、0.15 円/Nm<sup>3</sup>となり、全体に占める割合は小さい。

### 2.2.5 水素製造コスト

熱効率 50%、稼働率 80%の場合には、水素製造コストは 25.4 円/Nm<sup>3</sup>となった。水素製造コストに対する稼働率と水素製造効率の感度を評価した結果を Table 4 に示す。稼働率 70%、水素製造効率 30%をそれぞれ 90%、50%まで高めると 21.6 円/Nm<sup>3</sup>のコストダウンが見こめる。また、水素製造コストの構成要素割合を Fig.2 に示す。水素製造コストに占める水素製造設備資本費の割合は約 13%、エネルギー費が占める割合は約 78%であり、エネルギー単価の低減、すなわち、高温ガス炉の建設コストの削減、稼働率の向上が水素製造コストの削減に大きく寄与することがわかった。水素製造量は、水素製造効率に比例し、所要熱は水素製造効率に反比

例することから、水素製造効率が5%上がれば、水素製造コストは10%下がるなど、熱効率の改善が水素製造コストの削減に大きく寄与することがわかった。

Table 5 に仏国原子力庁 (CEA) が実施した IS プロセス水素製造コストの評価例およびこれらを参考とした JAEA による評価例を示す。為替レートを 140 円/ユーロ (2014 年 5 月 : 139.2 円/ユーロ) とし、CEA の評価結果<sup>14)</sup>よりも熱効率、稼働率を高め、かつ、プラント規模拡大に際しスケールメリット (0.6 乗則) が適用できたとすると (熱効率 50%、稼働率 80%、水素製造量 85,400 Nm<sup>3</sup>/h を想定) とすると約 23 円/Nm<sup>3</sup>となり、今回評価した水素製造コスト 25.4 円/Nm<sup>3</sup>と同等であった。

次に、本評価と化石資源を原料とする水素製造法との水素製造コストの比較を Fig.3 に示す。化石資源を原料とする水素製造法のコスト評価と比較し易いよう、HTGR-IS の原料消費費はエネルギー費に含め、エネルギー費に含まれている高温ガス炉本体の資本費および運転維持費について、点線で図中に示した。化石資源を必要としない HTGR-IS では CCS (Carbon dioxide Capture and Storage、二酸化炭素の回収・貯留) が不要なこともあり、化石資源を原料とする水素製造法と比較しても遜色のない水素製造コスト評価結果となり、将来的に競合できる可能性を示した。

また、産業分野や一般市場におけるニーズに対して水素製造コストの競合性を検討した。燃料電池自動車 (FCV) 用水素燃料および水素還元製鉄用水素燃料に求められる水素製造コスト評価および HTGR-IS 水素製造コスト (Table 4 からの抜粋) を Table 6 示す。水素還元製鉄における競合可能な水素製造コストについては、JAEA から報告<sup>11)</sup>されている値を用い、FCV における競合可能な水素製造コストについては、水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループで報告<sup>12)</sup>されている値から、水素販売コスト 84~93 円/Nm<sup>3</sup>から圧縮・出荷、輸送および供給の費用 45.5 円/Nm<sup>3</sup><sup>13)</sup>を差し引いて算出した。この結果、熱効率 40%以上、稼働率 80%以上のケースで、HTGR-IS の水素製造コストはこれらニーズを満足できることから、これら HTGR-IS 水素製造コストを目標値として研究開発をすすめていく。

### 3. 結論

高温ガス炉 IS プロセス水素製造システムの経済性について、水素製造コストの評価を行った。

2章に示した評価条件を用いると HTGR-IS 水素製造コストは 25.4 円/Nm<sup>3</sup>であった。本評価における水素製造コストに占める水素製造設備の資本費の割合は約 13%、エネルギー費が占める割合は約 78%であり、エネルギー源である高温ガス炉の建設コストの削減、稼働率の向上が水素製造コストの削減に大きく寄与することがわかった。水素製造量についても、水素製造効率に比例し、所要熱は水素製造効率に反比例することから、水素製造効率が 5%上がれば、水素製造コストは 10%下がるなど、熱効率の改善が水素製造コストの低下に大きく寄与することがわかった。

化石資源を原料とする水素製造法との比較では、化石資源を必要としない HTGR-IS では CCS が不要なこともあり、将来的に競合できる可能性を示した。また、燃料電池自動車(FCV)用水素燃料および水素還元製鉄用水素燃料に求められる水素製造コスト評価を行い、HTGR-IS の水素製造コストはこれらニーズを十分満足しており、このことから本評価で示した HTGR-IS 水素製造コストを目標値として研究開発をすすめていく。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change : “IPCC Fifth Assessment Report”, available from <http://ipcc.ch/report/ar5/> (accessed 2014-07-28).
- 2) 経済産業省 : “水素・燃料電池戦略ロードマップ”, available from <http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004-2.pdf> (accessed 2014-07-28).
- 3) 電気事業連合会 : “モデル試算による各電源の発電コスト比較”, 総合エネルギー調査会 電気事業分科会 コスト等検討小委員会 (第9回), 資料4, (2004).
- 4) 武井正信他 : “高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTR300) の経済性”, 日本原子力学会和文論文誌, vol.5, No.2, (2006), pp.109-117.
- 5) 石油産業活性化センター : “水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置づけに関する調査報告書”, PEC-2002P-04, (2003).
- 6) 斉藤義巳 : “化学装置コストハンドブック 改定三版”, 工業調査会, 東京, (2000), pp.48-54.
- 7) 経済産業省 : “バックエンド事業全般にわたるコスト構造、原子力発電全体の収益性などの分析・評価”, 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会 コスト等検討小委員会, (2004).
- 8) コスト等検証委員会 : “コスト等検証委員会報告書”, エネルギー・環境会議, (2011).
- 9) 茨城県企業局 : “工業用水道事業 料金体系”, available from [http://www.pref.ibaraki.jp/bukyoku/kigyou/002\\_water\\_supply/industrial\\_water/fee\\_structure.html](http://www.pref.ibaraki.jp/bukyoku/kigyou/002_water_supply/industrial_water/fee_structure.html) (accessed 2014-08-01).
- 10) 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 : “石炭利用 CO2 回収型水素製造技術プロジェクト評価 (事後) 報告書”, (2009), p.17.
- 11) 笠原清司他 : “高温ガス炉を用いた水素還元製鉄プロセスの概念検討”, 鉄鋼協会第163回春季講演大会, 横浜国立大学, (2012).
- 12) 経済産業省 : “トヨタのFCV開発の取り組みと普及に向けた課題”, 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ 第3回, [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/suiso\\_nenryodenchi\\_wg/pdf/003\\_s02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/003_s02_00.pdf) (accessed 2014-08-05).
- 13) 石本祐樹他 : “高温ガス炉から供給される水素の経済性評価”, 季報エネルギー総合工学, vol.31, No.3, (2008), pp.45-51.
- 14) J. Leybros et al. : “Plant sizing and evaluation of hydrogen production costs from advanced processes coupled to a nuclear heat source”, Int. J. Hydrogen Energy, vol.35, No.3, (2010), pp.1008-1028.

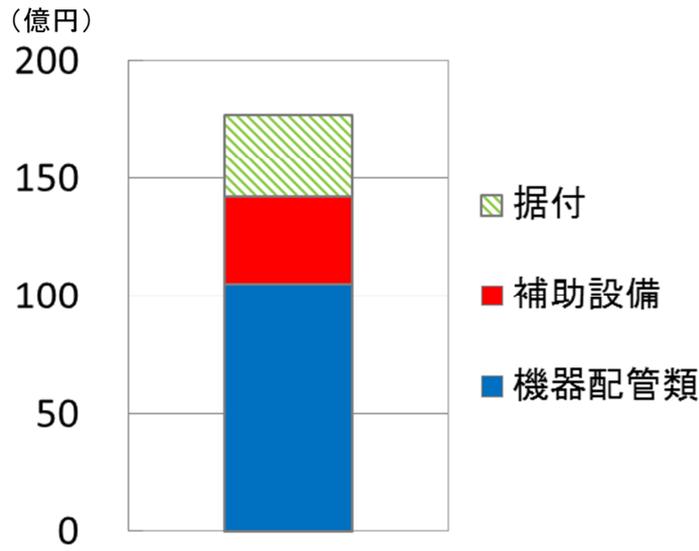


Fig.1 ISプラントの建設費内訳

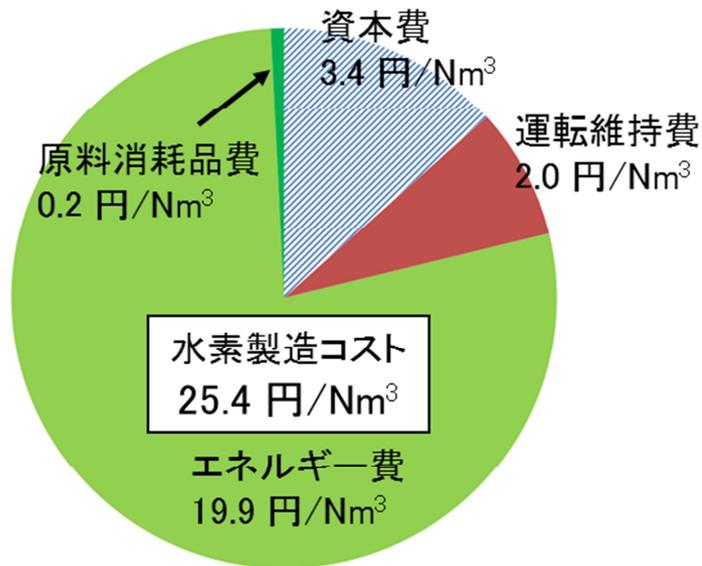
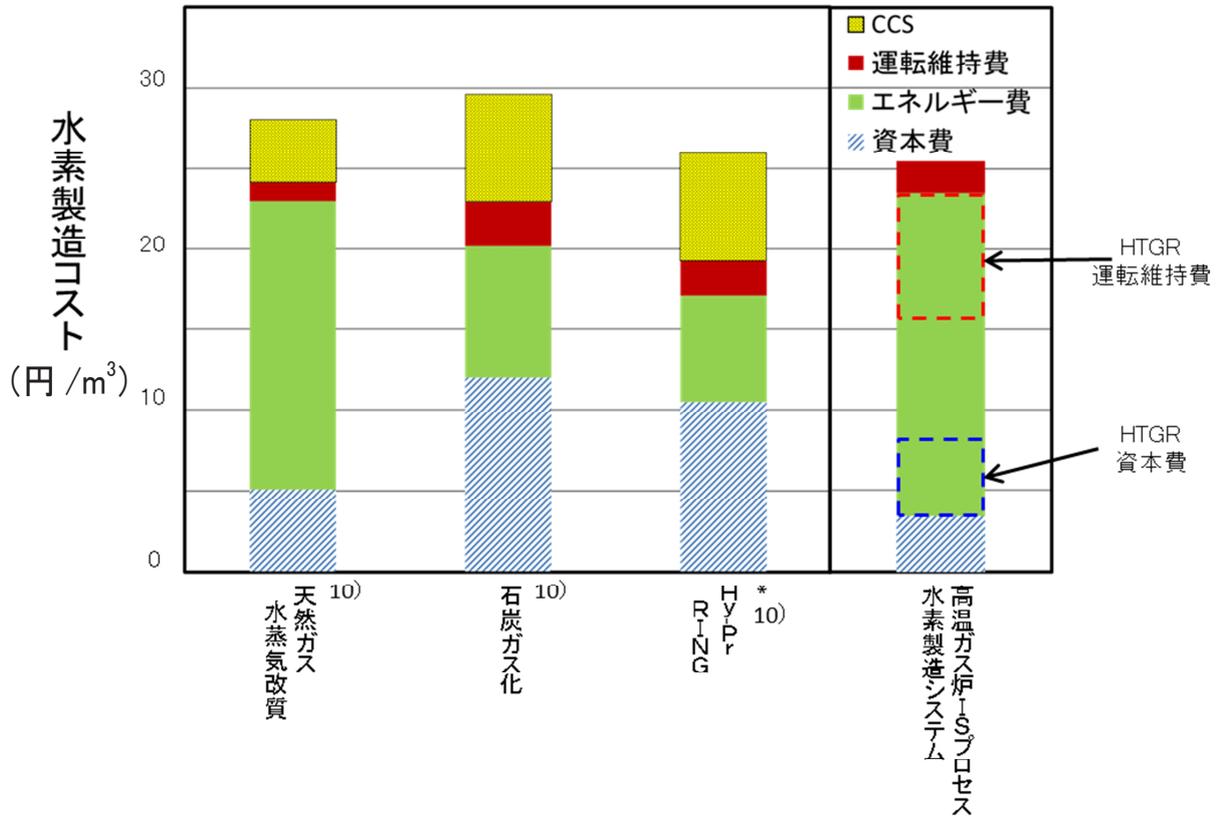


Fig.2 水素製造コストの構成要素割合 (水素製造効率 50%、稼働率 80%)



\*HyPr-RING 法: 石炭ガス化炉内に直接 CO<sub>2</sub> 吸収材である CaO を添加し、生成する CO<sub>2</sub> を CaCO<sub>3</sub> として固定することで、一つの炉内で水素を生成する方法。

Fig.3 化石資源を原料とする水素製造法と HTGR-IS との水素製造コストの比較

Table 1 資本費の評価結果

資本費 (円/Nm <sup>3</sup> )	減価償却費 (円/Nm <sup>3</sup> )	固定資産税 (円/Nm <sup>3</sup> )	稼働率 (%)	水素製造効率 (%)
6.5	5.7	0.8	70	30
5.7	5.0	0.7	80	
5.0	4.4	0.6	90	
4.9	4.3	0.6	70	40
4.3	3.8	0.5	80	
3.8	3.3	0.5	90	
3.9	3.4	0.5	70	50
3.4	3.0	0.4	80	
3.0	2.6	0.4	90	

Table 2 運転維持費の評価結果

運転維持費 (円/Nm <sup>3</sup> )	修繕費 (円/Nm <sup>3</sup> )	諸費 (円/Nm <sup>3</sup> )	給料手当 (円/Nm <sup>3</sup> )	事業報酬 (円/Nm <sup>3</sup> )	稼働率 (%)	水素製造 効率 (%)
3.8	1.7	0.4	0.3	1.4	70	30
3.3	1.5	0.3	0.3	1.2	80	
3.0	1.3	0.3	0.3	1.1	90	
2.8	1.3	0.3	0.2	1.0	70	40
2.5	1.1	0.3	0.2	0.9	80	
2.2	1.0	0.2	0.2	0.8	90	
2.3	1.0	0.3	0.2	0.8	70	50
2.0	0.9	0.2	0.2	0.7	80	
1.8	0.8	0.2	0.1	0.7	90	

Table 3 エネルギー費の評価結果

エネルギー費 (円/Nm <sup>3</sup> )	発電費 (円/Nm <sup>3</sup> )	熱供給費 (円/Nm <sup>3</sup> )	稼働率 (%)	水素製造効率 (%)
35.4	1.6	33.8	70	30
32.2	1.5	30.7	80	
30.2	1.4	28.8	90	
26.9	1.6	25.3	70	40
24.5	1.5	23.0	80	
23.0	1.4	21.6	90	
21.9	1.6	20.3	70	50
19.9	1.5	18.4	80	
18.7	1.4	17.3	90	

Table 4 水素製造コストの評価結果

水素製造 コスト (円/Nm <sup>3</sup> )	資本費 (円/Nm <sup>3</sup> )	運転維持 費 (円/Nm <sup>3</sup> )	エネルギー 費 (円/Nm <sup>3</sup> )	原料消耗 費 (円/Nm <sup>3</sup> )	稼働率 (%)	水素製造 効率 (%)
45.2	6.5	3.8	35.4	0.2	70	30
41.4	5.7	3.3	32.2	0.2	80	
38.4	5.0	3.0	30.2	0.2	90	
34.8	4.9	2.8	26.9	0.2	70	40
31.4	4.3	2.5	24.5	0.2	80	
29.2	3.8	2.2	23.0	0.2	90	
28.1	3.9	2.3	21.9	0.2	70	50
25.4	3.4	2.0	19.9	0.2	80	
23.6	3.0	1.8	18.7	0.2	90	

Table 5 仏国原子力庁（CEA）による IS プロセス水素製造コスト評価およびこれらを参考とした JAEA による評価

	プロセスの特徴	熱効率 [%]	稼働率 [%]	プラント規模 (水素製造量 [Nm <sup>3</sup> /h])	コスト [円/Nm <sup>3</sup> ]
CEA-A	現状技術 ・高価耐食材料	38	80	8,000	114
CEA-B	将来技術 ・機器コスト低減 (安価材料)	38	80	8,000	49
HTGR-IS*	将来技術 ・機器コスト低減 (安価材料) ・高熱効率化, プラント規模拡大	50	80	85,000	23

\* CEA-B の評価を基に、熱効率を向上およびプラント規模の大型化によるスケールメリットを 0.6 乗則を適用できた場合。

Table 6 産業分野における水素製造コストの競合性

HTGR-IS 水素製造コスト [円/Nm <sup>3</sup> ]	熱効率 [%]	稼働率 [%]	水素還元製鉄における競合可能な水素製造コスト [円/Nm <sup>3</sup> ]	FCVIにおける競合可能な水素製造コスト [円/Nm <sup>3</sup> ]
45.2	30	70	33 <sup>11)</sup>	39~48 <sup>12)</sup>
41.4	30	80		
31.4	40	80		
25.4	50	80		

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

