

# JAEAにおける 原子力水素製造技術開発の展開

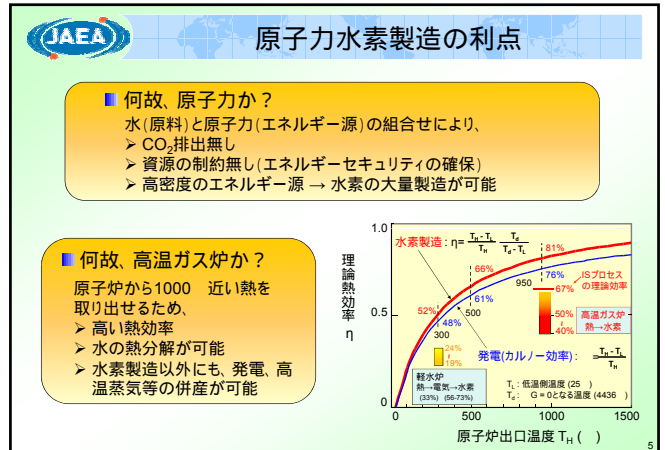
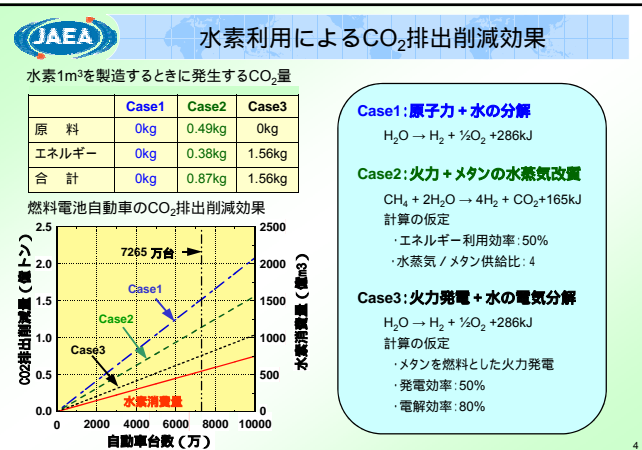
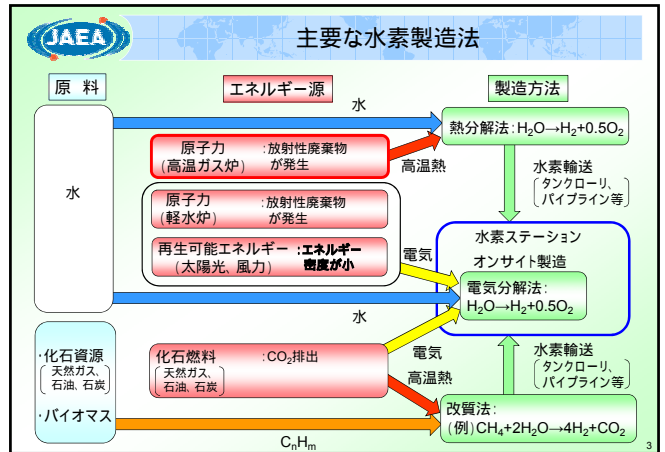
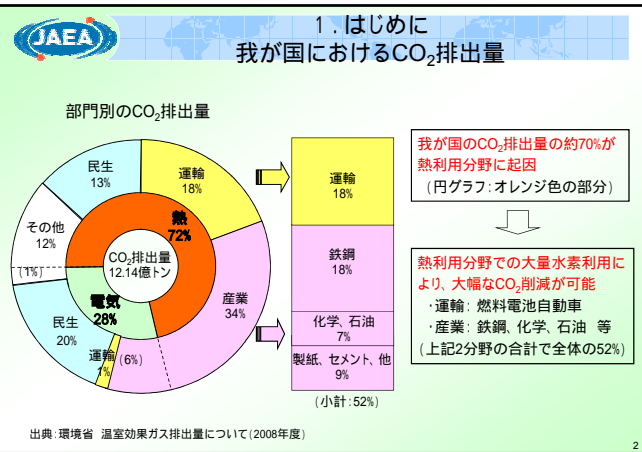
2010年10月12日

(独)日本原子力研究開発機構  
原子力水素・熱利用研究センター  
稲垣 嘉之



## 講演の目次

1. はじめに
2. 高温ガス炉の特徴と研究開発状況
3. 熱化学法ISプロセスの特徴と研究開発状況
4. 2100年原子力ビジョン  
- 低炭素社会への提言 -
5. まとめ



## 2. 高温ガス炉の特徴と研究開発状況 高温ガス炉と軽水炉の主な仕様比較

項目	高温ガス炉	軽水炉
燃料	二酸化ウラン 被覆燃料粒子(セラミック)	二酸化ウラン 金属被覆(ジルカロイ)
減速材	黒鉛	軽水
冷却材	ヘリウム	軽水
最大出力	600MW程度 中小型	4000MW程度 大型
原子炉出口温度	950	約300
熱利用	多様な用途 水素製造、高温蒸気、発電	発電が主

## 高温ガス炉の特徴

### 優れた安全性

- 燃料: 高温に耐える  
4重被覆によるFP閉じ込め能力大
- 炉心: 溶融なし
- 冷却材: 相変化なし  
化学反応なし

↓

**シビアアクシデントなし**

### 高温ガス炉の構造

燃料: SiC・炭素の4重被覆

炉内構造物: 黒鉛(熱容量大)

冷却材: ヘリウムガス(950)

### 多様な核熱利用

温度(°C): 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200

ガスタービン発電  
水素からの水素製造  
天然ガスからの水素製造  
石油精製  
地域暖房、海水淡化

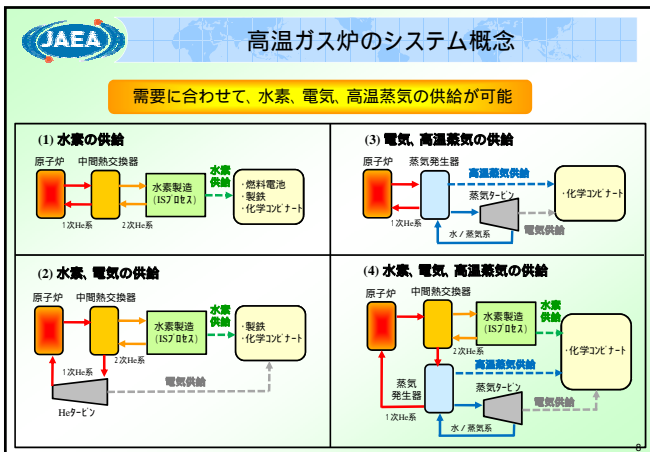
HTTRの炉内構造物

### 高温ガス炉の特長

- 高い耐熱性  
燃料制限温度1600  
(軽水炉の破損温度制限: 700程度)

0.92mm (燃料粒子径)  
39mm (燃料コンボット径)  
34mm (燃料粒子間隙)  
560mm (燃料床高さ)

燃料コンボット 燃料粒子 燃料床



## 高温ガス炉を用いた 水素/電気併産

水素製造プラント  
熱化学法ISプロセス

高温ガス炉

発電プラント  
ガスタービン

原子炉

中間熱交換器

項目	値
原子炉出力	600MW
(水素/発電)	170/430MW
原子炉出口温度	950
原子炉入口温度	587
1次冷却材流量	318kg/s
1次冷却材圧力	7MPa
連続運転期間	1.5年
総容量	11800M <sup>3</sup> /t
発電量	197MWh
水素製造量	51t/日
発電効率	45.8%
水素製造効率	45~55%

## HTTRと水素製造技術

### HTTR

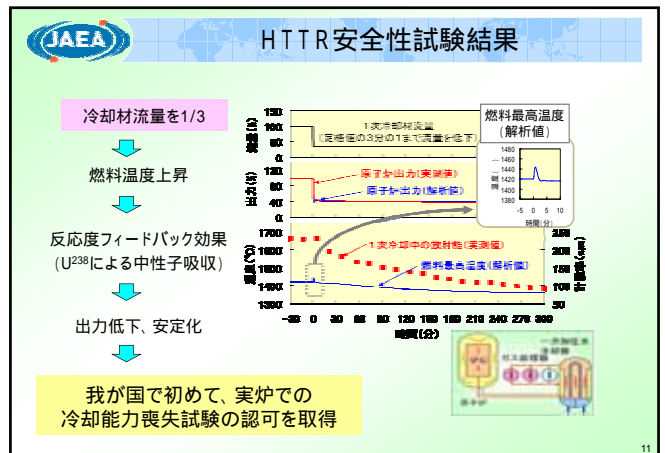
### 主要仕様

- 熱出力 ; 30MW
- 一次冷却材
- 出口温度 ; 850 / 950
- 圧力 ; 40気圧

### 経緯

1998年度: 初臨界達成  
2001年度: 全出力達成  
2002年度: 安全性実証試験開始  
2004年度: 950 達成

- ◇ 2005~2009年度; 基本特性試験
- ◇ 2010~2014年度; 限界性能試験、熱利用特性試験等
- ◇ 2015以降 ; HTTR水素製造試験等



### JAEA HTTR 50日高温(950℃)試験

2010年1~3月実施

- 燃料被覆材の優れた放射性物質閉じ込め性能
- 制御棒による良好な反応度制御

● 照射による被覆材の損傷検知せず!

● 建設時: 可燃性毒物による余剰反応度の調整  
● 運転中: 制御棒による反応度制御

● 制御棒移動量がわずが、制御棒位置が大きく変化せず

### JAEA 高温ガス炉の研究開発の動向

日本 高温工学試験研究炉 (HTTR)

- 1998年 初臨界
- 2001年 30MW, 850℃達成
- 2004年 90℃減速
- 2010年 60日高温(950℃)連続運転

我が国が世界で唯一、水素製造に必要とされる原子炉出口温度950℃を達成し、世界の高温ガス炉開発をリード

韓国 NHDD計画

- 2003年1月 10MW, 700 (商業タービン発電2.5MW)
- HTR-PM: 発電用炉 250MW(210MW) × 2基, 750 (山東省威海市) 2009年運転開始予定

中国 HTR-PM計画

- 2007年1月設立: 中国華能集団公司、中国核工業建設集団公司、清華控股有限公司が共同出資
- 2020年までに19組(38基)の建設を計画

韓国 NHDD計画

- 2010年 200MW, 750
- 2015年運転開始予定
- 2020年運転開始予定

南アフリカ PBMR (発電用炉) 200MW, 750 2015年運転開始予定 2020年運転開始予定

第4世代原子炉システム国際フォーラム (GIF) 高温ガス炉 (HTR) 等の国際共同研究 (日、米、仏、独、スイス、韓、ユークラム)

### JAEA 中国HTR - PM計画の概要

HTR-PMの建設状況 (2009年9月)

華能山東石島核電有限公司が建設・運転 (2007年1月設立: 中国華能集団公司、中国核工業建設集団公司、清華控股有限公司が共同出資)

105MWe X 2基 (750℃)

原子炉  
蒸気タービン  
発電機

2020年までに19組(38基)の建設を計画

### JAEA 韓国NHDD計画の概要

- 原子力水素主要技術開発プロジェクト (2006~2017, 現在進行中)
  - NHDD計画に向けた主要基盤技術開発
- NHDD計画 (2010~2026, 検討中): 原子力水素製造システムの設計、建設、建設、実証 (NHDD: Nuclear Hydrogen Development and Demonstration)

韓国製鉄会社ポスコが、KAERIと協力して、高温ガス炉水素還元製鉄を検討 (電気新聞 2010年8月24日)

### JAEA 3. 熱化学法ISプロセスの特徴と研究開発 熱化学法 IS プロセスの原理

- 水熱分解反応が自発的に進む温度は4000℃以上
- 三つの化学反応を用い1900℃程度で水を熱分解

熱 → 電気 → 水素より 熱 → 水素

I: ヨウ素, S: 硫黄

$$2HI \rightarrow H_2 + I_2$$

$$H_2SO_4 \rightarrow 1/2O_2 + SO_2 + H_2O$$

$$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$$

$$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$$

### JAEA 水素製造研究開発計画

実験規模試験 (閉サイクル条件の創明) (1997年) → 工学基礎試験 (閉サイクル制御技術の開発) (2004年) → 技術確証・信頼性試験 (大規模化技術の開発) (現在) → HTTR-IS試験 (1000m<sup>3</sup>/h規模) (原子力水素の実証)

毎時約30%の水素を1週間にわたって連続製造することに成功 (2004年)

セラミックス硫酸分解器の試作 (2006年)

HTTRとISプロセス水素製造を接続

世界各国でISプロセスの研究開発が活発化

## 水素製造技術の確証試験

**耐食機器開発**

高温硫酸分解試験ループ



硫酸ループ試験 (配管、弁、ポンプ)



**水素製造効率向上技術**

ブンゼン反応試験



分離膜試験



**材料腐食試験**

硫酸蒸発器漏れ試験



**プロセス解析コード開発**

化学平衡試験



18

## ISプロセスの研究開発の動向



**欧州**

研究機関: CEA (仏), ENEC (伊), シェアフィールド大 (英), 他

セラミックス反応器開発を実施 (FP7プログラム)

連続水素製造は未実施

**中国**

研究機関: 清華大, 浙江大

基礎研究に着手, 効率技術として高分子分離膜を研究

連続水素製造は未実施

**米国**

研究機関: セネラルアトモックス社, 他

基礎研究

連続水素製造は未実施

**日本**

研究機関: 原子力機構

制御技術を開発し33L/h規模の連続水素製造を達成(2004)

強腐食性環境で用いる30m<sup>3</sup>/h規模のセラミックス製硫酸分解器の試作(2005)

など、世界のISプロセス研究開発をリード。

**インド**

研究機関: BHABHA 原子力研究センター

基礎研究

連続水素製造は未実施

**韓国**

研究機関: 韓国原子力研究院, 韓国エネルギー研究院, 他

実験室規模水素製造試験を実施中, セラミックス破損型耐食反応器の開発研究

連続水素製造は未実施

19

## ISプロセスの水素製造コスト

ケース	条件	材料	熱効率 (%)	稼働率 (%)	水素製造量 (Nm <sup>3</sup> /h)	為替 (円/1-E)	水素製造コスト (円/Nm <sup>3</sup> )		
							水素製造設備	高温ガス炉	合計
JAEA <sup>1)</sup>	将来技術 (鉄)		50	85	52,000	-	6~11	15	21~26
CEA-A <sup>2)</sup>	将来技術 (鉄)		38	80	8,000	115	19	20	39
CEA-A <sup>3)</sup>	将来技術 (鉄)		50	85	52,000	115	5	15	20
CEA-B <sup>2)</sup>	現状技術 (耐食材料)		38	80	8,000	115	73	20	93
CEA-B <sup>3)</sup>	現状技術 (耐食材料)		50	85	52,000	115	17	15	32

(CEA: フランス原子力庁)

注)

1) 文献: Nishihara et al., ICONE15, Nagoya, April, 2007, ICONE15-10157.

2) 文献: Leybros et al., Int. J. Hydrogen Energy, 35 (2010) 1008-1018. N号機の経済性情報を抜粋.

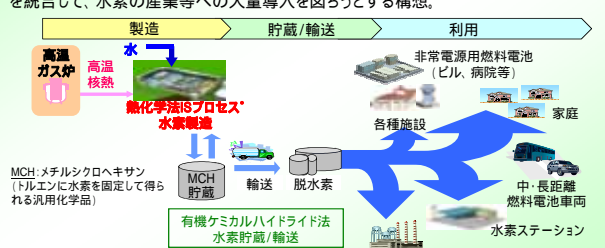
3) JAEAと同じ熱効率、稼働率、水素製造量で算出.

20

## 大量水素サプライチェーン構想

(1) 無尽蔵の水を原料として高温核熱のみで水素を大量、かつ炭酸ガスフリーで製造できる**熱化学法ISプロセス水素製造技術**.

(2) 大量の水素を有機物(液体)に転換して既存石油インフラを活用した貯蔵/輸送を行う**有機ケミカルハイドライド法水素貯蔵/輸送技術**を統合して、水素の産業等への大量導入を図ろうとする構想。



製造 → 貯蔵/輸送 → 利用

製造: 高温ガス炉 (高温核熱) → 熱化学法ISプロセス水素製造 → 水素製造

貯蔵/輸送: MCH貯蔵 (メチルシクロヘキサン) → 輸送 → 脱水素 → 有機ケミカルハイドライド法水素貯蔵/輸送

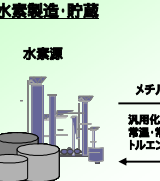
利用: 非常電源用燃料電池 (ビル, 病院等), 各種施設, 家庭, 中・長距離燃料電池車両, 水素ステーション, 還元製鉄, 石油精製, 化学製品製造

21

## 有機ケミカルハイドライド法 - 概要

**水素製造・貯蔵**

水素源



水素化反応 (水素貯蔵反応)

$$\text{トルエン} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{メチルシクロヘキサン (MCH)} + 3\text{H}_2\text{O} \quad 206\text{kJ/mol}$$

**輸送**

メチルシクロヘキサン (MCH) を輸送 (トラック)

トルエンを輸送 (回収・再利用)

**貯蔵・水素供給**

水素ステーションで利用する場合

FCVへ水素供給

脱水素反応 (水素貯蔵反応)

$$\text{メチルシクロヘキサン (MCH)} \rightarrow \text{トルエン} + 3\text{H}_2 \quad 206\text{kJ/mol}$$

製油所を水素源として、水素を汎用化学品のトルエンに水素化反応によって固定、メチルシクロヘキサン (MCH) として水素を貯蔵。

水素ステーションでは、メチルシクロヘキサン (MCH) から脱水素反応によって、水素発生、精製、圧縮してFCVへ供給する。

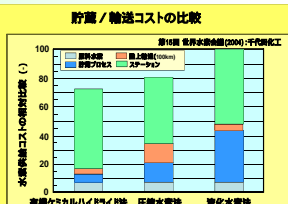
22

## 有機ケミカルハイドライド法 - 特長

### 有機ケミカルハイドライドの特長

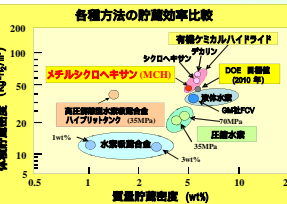
極低温や超高压の条件が必要なく、**常温・常圧の液体化学品として大量貯蔵、長距離輸送が可能**。特殊な容器が不要なので、容器を含めた**貯蔵密度が圧縮水素法や液化水素法に比べて高い**。トルエン、MCHともに汎用化学品として大量の流通実績があり、**大量調達が可能**。トルエン、MCHともにガソリンと同様に扱えるため、**ガソリン流通の既存インフラ (貯蔵タンク、原油タンク、ローリー等) の転用が可能**なため社会投資コストが少ない。長期の間、安定してロスなく貯蔵が行えるため、**水素の長期備蓄も可能**。**水素の大量長距離輸送技術に選んだ特長を持つ技術である**。

**貯蔵/輸送コストの比較**



単位: 1000円/1000kg (2000年) 千円/100kg

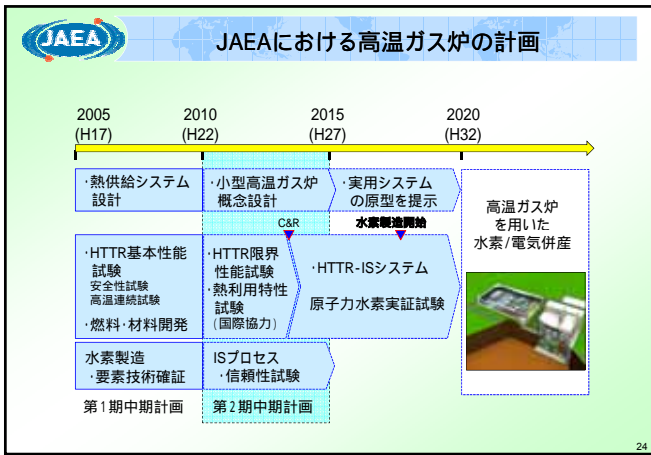
**各種方法の貯蔵密度比較**



単位: kg-H<sub>2</sub>/kg

23





### 4. 2100年原子力ビジョン ビジョン策定の背景と狙い

**【エネルギー環境問題への関心の高まり】**

- 世界全体で2050年までに温室効果ガス排出量の半減が目標 (クールアース50)
- 発電過程で二酸化炭素を排出せず、かつ安定して経済的な電力供給が可能な原子力発電の導入拡大が世界的な低炭素社会の実現に不可欠 (原子力委地球環境保全・エネルギー安定供給のための原子力のビジョンを考える懇談会)
- 原子力は温室効果ガスの排出量を減少させる不可欠の手段 (洞爺湖サミット合意文書)

**【国民議論】**

エネルギー源の選択は暮らしや社会のあり方そのものの選択に他ならず、国民一人ひとりが議論へ参画が必要

議論の素材として、再生可能エネルギーと原子力の最大限活用によりエネルギー環境問題の解決が可能であることを示す。  
(ポイントは「CO2低排出化」と「エネルギー安定供給」)

