



第14回原子力機構報告会

高温ガス炉による 水素製造技術の研究開発 —HI分解器用の高性能水素分離膜の開発—

令和元年11月12日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所

高温ガス炉研究開発センター

水素・熱利用研究開発部 ISプロセス試験グループ

ミヤグマラジャブ オドツェツェグ

課題

- 気候変動問題解決に向けCO₂排出量削減が急務
- 水素利用によるCO₂排出量削減効果が期待されるが、CO₂フリーの水素製造法及び大量の水素を安定供給可能なシステムが必要

(革新的原子炉システムの探求)

解決策

高温ガス炉水素製造システムの開発

- ISプロセス水素製造法を組み込んだ高温ガス炉水素製造システムにより、CO₂フリーの大規模水素製造を実現
- ISプロセス実用化に向けて必要な技術の1つとして、高性能水素分離膜を開発

将来成果

- 高温ガス炉水素利用によるCO₂排出量削減
- 水素の安定供給によるエネルギーの安定確保
- 水素社会（未来社会）の実現

将来ビジョン「JAEA 2050 +」 具体的テーマ

安全の追求

革新的原子炉システムの探求

放射性物質のコントロール

デコミッショニング改革

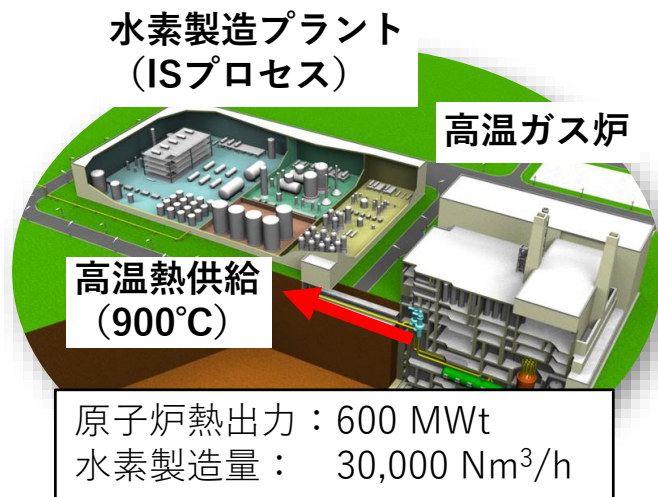
高度化・スピノフ

新知見の創出

● 高温ガス炉水素製造システム

高温ガス炉と熱化学法ISプロセス水素製造法を組合せ、
CO₂フリーの大規模水素製造を実現

将来ビジョン の課題	導入効果
気候変動問題 の解決	<p>▶ 高温ガス炉水素利用によるCO₂削減 2013年比約6%のCO₂削減*に貢献 *水素還元製鉄、FCV、定置用FCへの利用で78 Mt/y削減 ↳ 全製鉄量の32%を置換し56 Mt/y 削減</p>
エネルギーの 安定確保	<p>▶ 水素需要を満たす安定供給 2050年の水素需要*の約40%を供給可能 *水素還元製鉄、FCV、定置用FCの所要量 (9 Mt/y)</p>
未来社会 (Society5.0) の実現	<p>▶ 水素社会の実現 ▶ 水素/電力の併産による効率的な エネルギー利用</p>



高温ガス炉水素製造システム

Ref.) 松尾ら, 2050年の低炭素社会に向けた水素エネルギーの位置づけと導入見通し, 日本エネルギー経済研究所サイト, 2013年4月19日掲載
Steel statistical yearbook 2017, World Steel Association, 2018.
国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス, 日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2016年度確報値)

● 政策的位置づけ

「水素・燃料電池戦略ロードマップ」 (平成31年3月 水素・燃料電池戦略協議会/経産省)

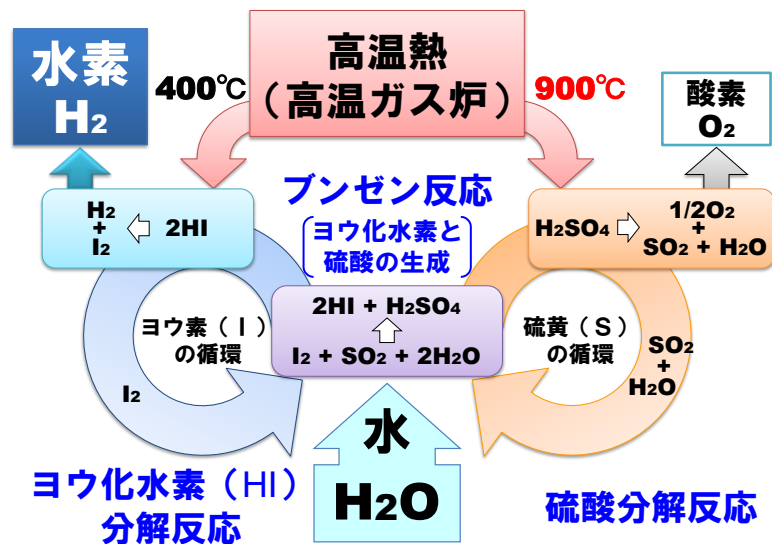
「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」 (令和元年6月 閣議決定)

において、高温ガス炉ならびにISプロセスについて記載

● ISプロセスの特徴

- ✓ **ヨウ素 (I)** と **硫黄 (S)** を利用し、**900°Cの熱**で水を熱分解
(熱のみでは4000°C必要)

- ◆ ヨウ素、硫黄はプロセス内で循環し、有害物質を排出しない
- ◆ 高温ガス炉との組合せでCO₂フリー



ISプロセスの概要

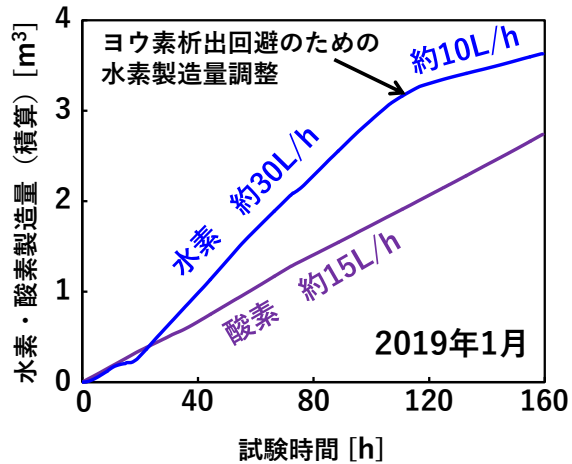
● 実用化に向けた技術課題

- ✓ 高温、強腐食性環境 → **耐食・耐熱機器の開発**
 - ✓ 安定した水素製造 → **プロセス制御法の開発**
- 工業材料製装置による連続水素製造 (150時間) により、世界の研究開発をリード
※制御に必要な多成分溶液の組成分析を担当

- ✓ 水素製造効率向上 → **効率向上技術の開発** → 目標効率達成に不可欠な **高性能水素分離膜を開発中**
(実用プラント目標：50%)

連続水素製造試験

連続水素製造試験装置



● 実用化に向けた技術開発

- 機器スケールアップ、腐食データ取得
- 組成制御法の確立
- 原子炉との接続技術
- 高効率化に向けた**膜反応器の開発**
(水素分離膜開発 等)

民間への技術移転

実用化

2045年頃

大型膜反応器性能実証
(HTTR熱利用試験)

HTTR
熱利用試験

2035年頃

膜反応器性能実証
(連続水素製造試験)

膜反応器開発

水素分離膜開発

工業材料機器試験
2010~

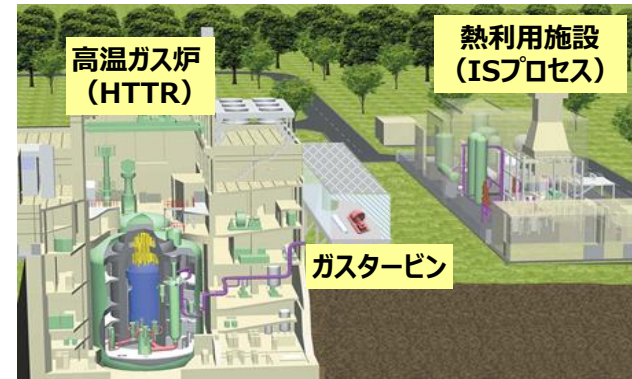
現在

要素技術開発
2005~2009

実験室規模試験、
工学基礎試験
~2004

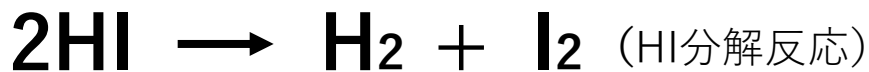
【研究開発目標】

高温ガス炉水素製造基盤技術の確立



HTTR：高温工学試験研究炉（大洗研究所）

● HI分解器の課題：HI分解反応率の向上

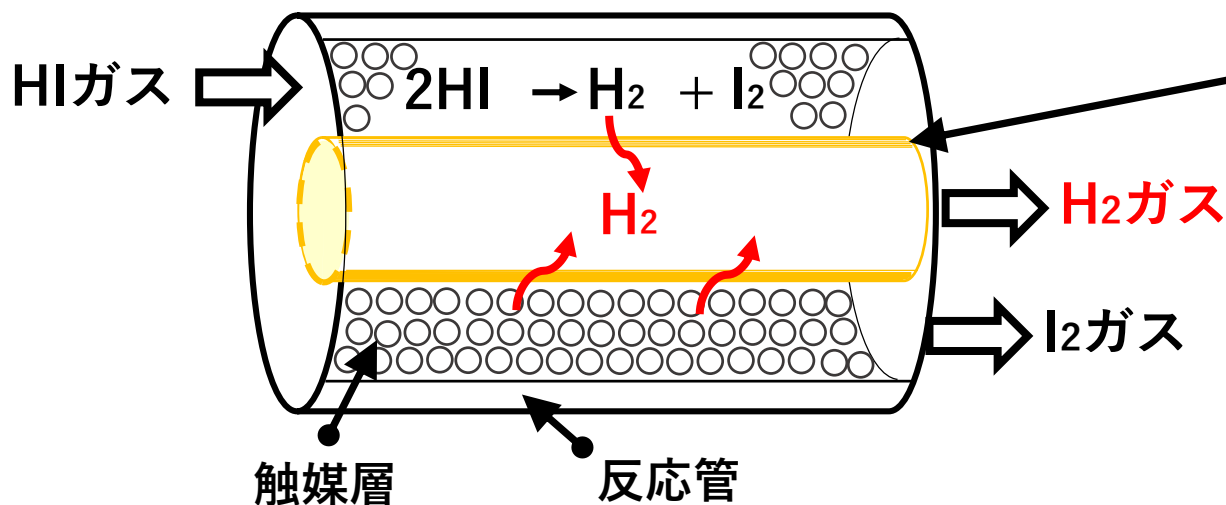


低いHI分解反応率：20%
(平衡反応率)

高温ガス炉水素製造システム

水素製造効率50%達成に、
HI分解反応率50%が必要

● 解決策：膜反応器の導入



水素分離膜

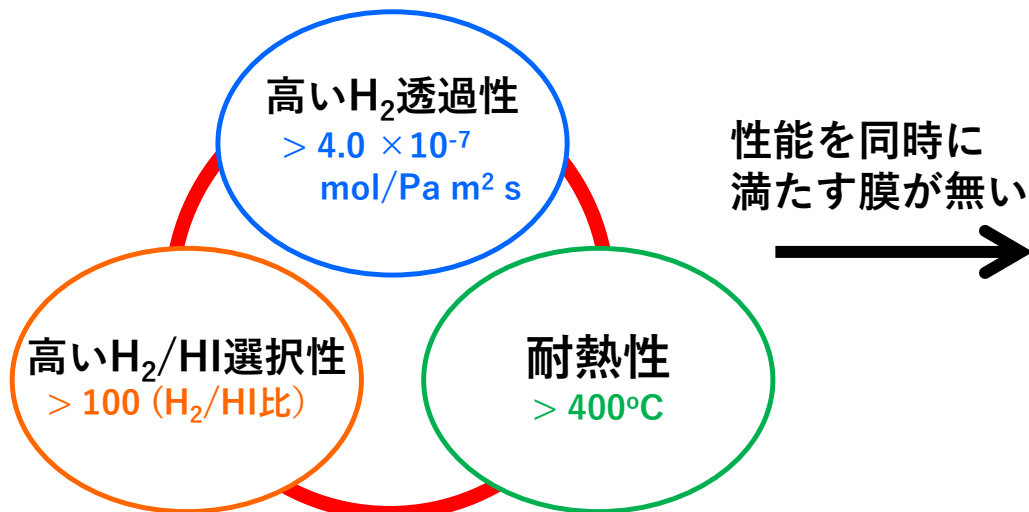
水素分離膜により
H₂ガスを選択的に引き抜く

↓
HI分解反応率向上
(50%達成可能)

HI分解環境（高温、強腐食性ガス）で使用できる水素分離膜が必要

→ HI分解環境に耐えるシリカ膜を基に、高性能水素分離膜を開発

シリカ膜性能目標 (HI分解反応率50%)



● 必要な膜特性

透過性	H ₂ 透過が容易な薄膜
選択性	均一な細孔径 H ₂ (分子径: 0.29 nm) → 透過 HI (分子径: 0.42 nm) → 不透過
耐熱性	400°Cで使用できる基材、シリカ源

1 nm = 10⁻⁹ m

シリカ膜の材料・製膜法の組合せを選定

シリカ源	HTMOS [Si(OCH ₃) ₃ C ₆ H ₁₃] ・400°Cで安定なシリカ形成
基材	多孔質アルミナ ・耐熱性
製膜法	化学蒸着(CVD)法 ・均一性に優れた薄膜形成

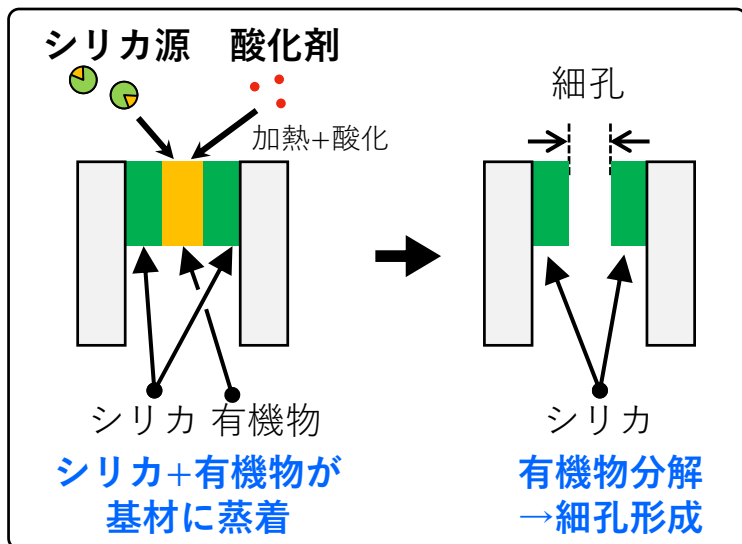
必要な膜特性を決定、材料・製膜法の組合せを最適化。高性能膜開発に目途をつけた。

● 残された問題点

HTMOSを用いたCVD法で、均一な膜を得る条件が不明

CVD条件を制御し、目標性能を満たすシリカ膜の製膜条件を明らかにする

● CVD法によるシリカ膜製膜



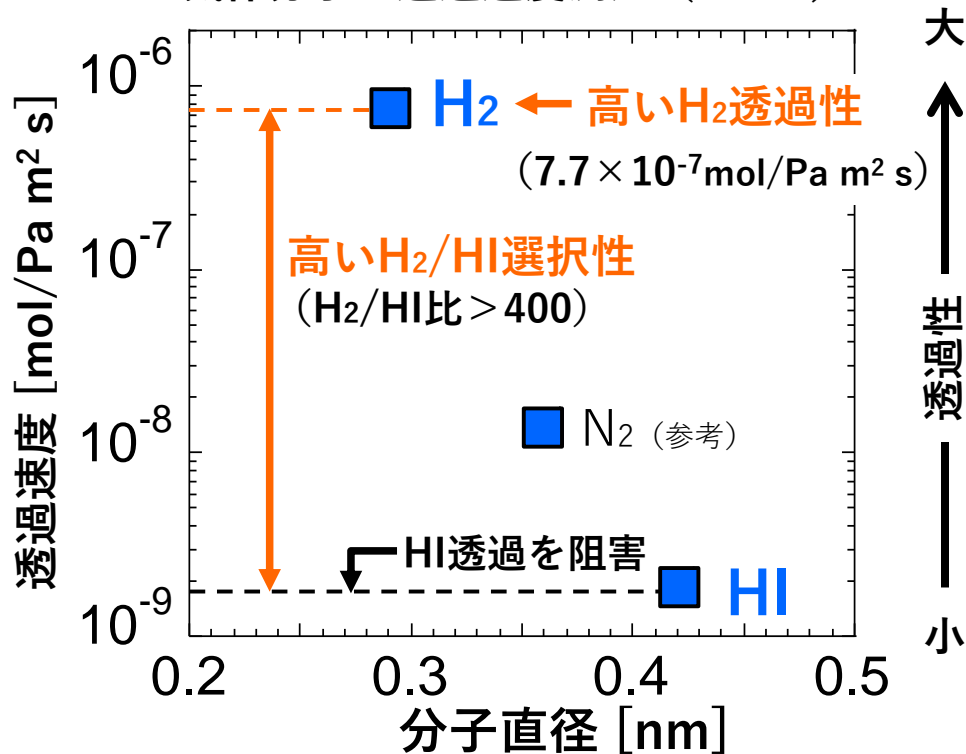
CVD条件の制御

蒸着温度・時間、シリカ源濃度、酸化剤・N₂キャリアガス流量

↳ 要求される膜特性をHTMOSから形成する条件を決定

● シリカ膜の性能評価

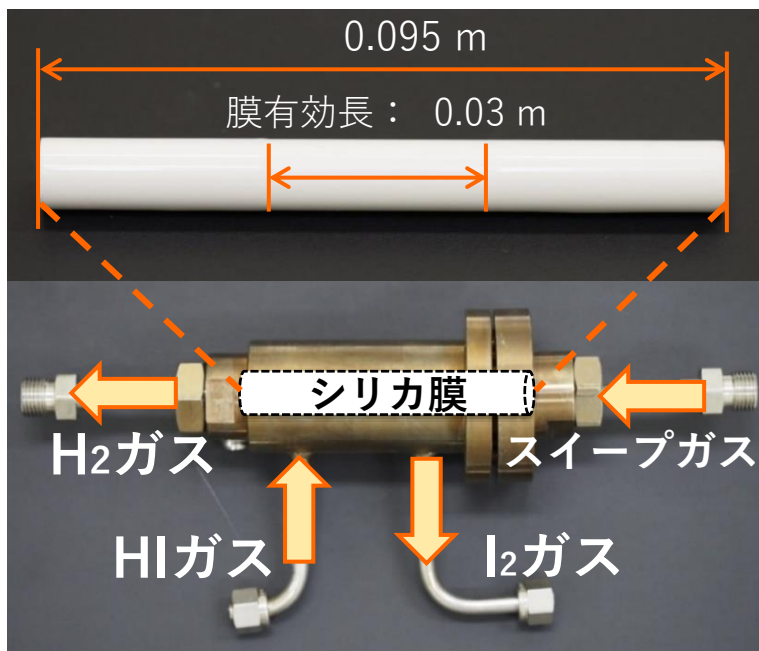
気体分子の透過速度測定 (400°C)



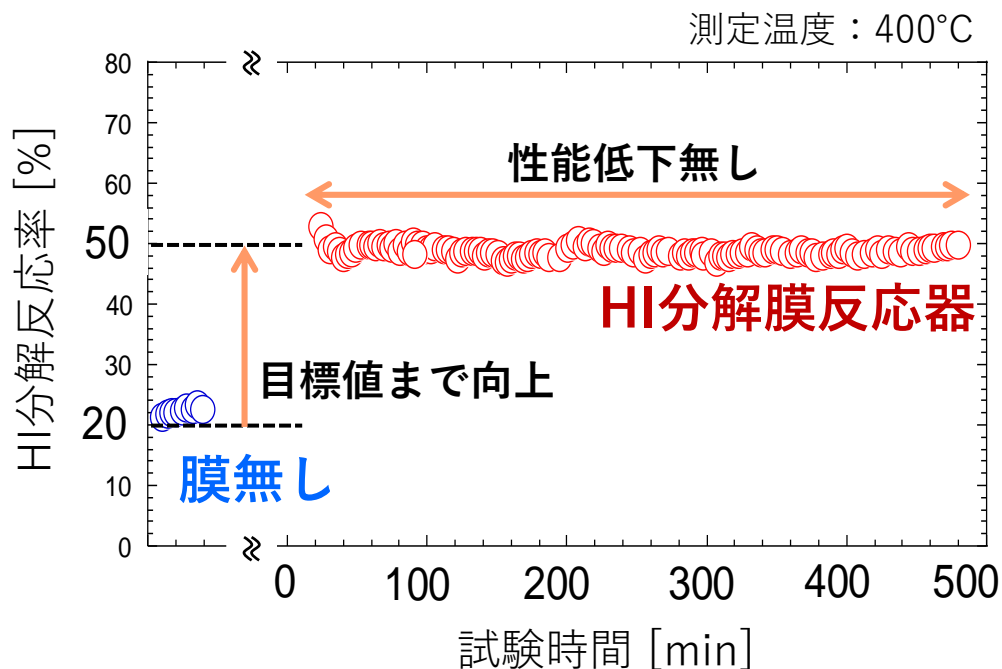
HTMOSをシリカ源とした高性能水素分離膜の製膜に成功

小型のHI分解膜反応器を試作し、HI分解反応率の目標達成を確認

● HI分解膜反応器の試作



● HI分解反応率の測定



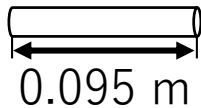
開発した高性能水素分離膜により、**HI分解反応率50%**を世界で初めて達成

→ 水素製造効率目標（50%）に必要な技術に目処

HI分解膜反応器の実用化に向け、大型化及び性能実証を進める

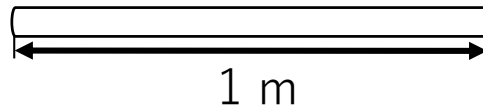
現状

現状：～0.1 m



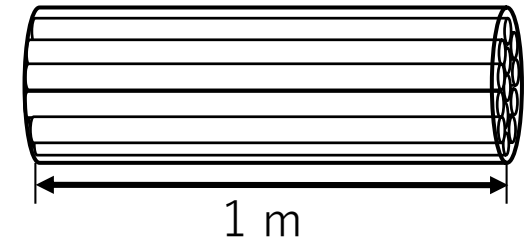
膜の長尺化

膜の長尺化
(実用：～1 m)



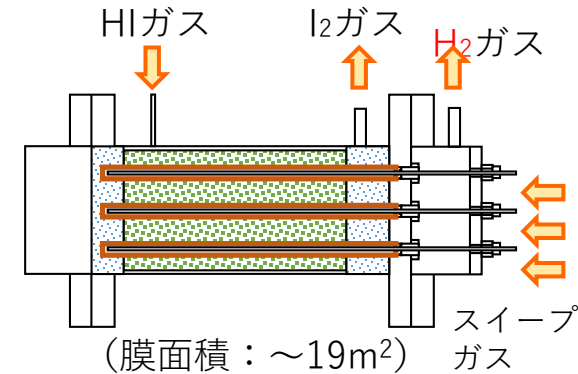
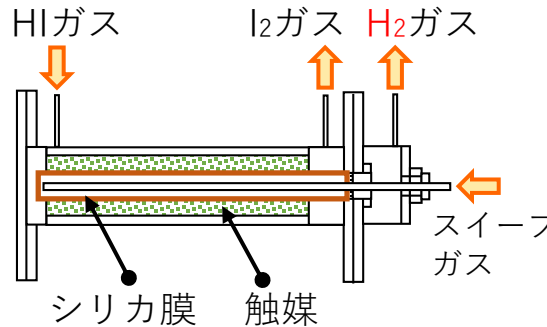
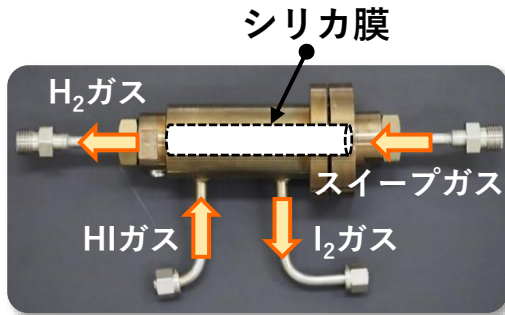
多管化による大型化

長尺膜の多管化



水素分離膜

膜反応器



実用プラントへの導入目標
(水素製造量：30,000 Nm³/h)

膜面積: 19m²/基 × 40基
多管化 並列化

課題

- 製膜技術
(長さ方向に均一な細孔径)
- 膜の耐久性

- 膜の結束・シール構造
(高温対応)
- 流路構造
(必要量のH₂引き抜き)

大型化したHI分解膜反応器を水素製造試験装置*に組み込み、性能実証を目指す

- ISプロセスのHI分解膜反応器用高性能水素分離膜を開発して水素製造効率50%達成に道筋をつけ、高温ガス炉水素製造システムの実用化に向けて前進した。
 - ✓ 必要なH₂透過性、H₂/HI選択性及び耐熱性を有する高性能水素分離膜の製膜に成功。400°Cで所定の性能が得られる水素分離膜は世界初。
 - ✓ 小型のHI分解膜反応器においてHI分解反応率を従来効率20%から50%まで向上させることに成功し、高温ガス炉の熱を用いたISプロセスによる水素製造効率50%の達成に道筋をつけた。
 - ✓ 今後、HI分解膜反応器の実用化に向け、膜の長尺化、多管化による大型化を進め、水素製造試験装置に組み込んだ性能実証を目指す。
- 高温ガス炉水素製造システムの実用化による水素の安定供給により、気候変動、エネルギーの安定確保の問題を同時に解決し、それを持続する未来社会（水素社会）構築に大きく貢献したい。