

パーベーパーレーション法のISプロセスへの 適用性評価

(共同研究)

Application of Pervaporation to IS Process

(Joint Research)

金川 昭宏* 岩月 仁 田中 伸幸 小貫 薫
福井 裕* 西林 俊樹*

Akihiro KANAGAWA*, Jin IWATSUKI, Nobuyuki TANAKA, Kaoru ONUKI
Hiroshi FUKUI* and Toshiki NISHIBAYASHI*

原子力基礎工学研究部門
ISプロセス技術開発グループ

IS Process Technology Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

December 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

パーバパーレーション法の IS プロセスへの適用性評価
(共同研究)

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット
金川 昭宏*1、岩月 仁、田中 伸幸、小貫 薫、福井 裕*2、西林 俊樹*2

(2007年10月11日受理)

熱化学水素製造法 IS プロセスにとって、ヨウ素を含むヨウ化水素酸 (HIx 溶液) からヨウ化水素を分離する方法の開発は重要な技術課題である。パーバパーレーション (PV) による HIx 溶液濃縮について、IS プロセスパイロットプラント試験装置への適用性評価の観点から、プロセス熱物質収支、水素製造量 30m³/h 規模の装置概念、及び膜モジュールの耐食性を検討し、以下の知見を得た。PV 法は、相変化のない電解電気透析法に比べ、水蒸発を伴うため熱効率は劣るものの、体積当たり大きな膜面積の得られる中空糸が利用できること及び電極が不要であることから、コンパクトな機器構成が実現できる。当該 PV に利用可能な Nafion 中空糸を組み込んだ膜モジュールが市販されており、構成材の大部分は 100°C の HIx 溶液に耐えるが、中空糸のバンドル材は耐食性を示さず耐食材料の選定が必要である。

本研究は日本原子力研究開発機構と三菱重工業株式会社との共同研究として実施したものである。
大洗研究開発センター(駐在)： 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

*1 三菱重工業株式会社 神戸造船所 (平成 19 年 3 月まで核熱応用工学ユニットに出向)

*2 三菱重工業株式会社 神戸造船所 原子燃料・バックエンド設計部

Application of Pervaporation to IS Process
(Joint Research)

Akihiro KANAGAWA*1, Jin IWATSUKI, Nobuyuki TANAKA, Kaoru ONUKI,
Hiroshi FUKUI*2 and Toshiki NISHIBAYASHI*2

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 11, 2007)

Separation of hydrogen iodide from HIx solution (HI-I₂-H₂O mixture) is one of the technical issues in the development of thermochemical IS process. Application of pervaporation (PV) to the concentration of HIx solution in the IS process pilot test plant was discussed from the viewpoints of process heat mass balance, conceptual design of the apparatus, and the corrosion resistance of the membrane module. Compared with the electro-electrodialysis system, the PV system enables the downsizing of apparatus by using hollow fiber membranes, although it does not improve the thermal efficiency of IS process. Immersion tests of commercially available Nafion hollow fiber membrane module in the HIx solution at 100°C indicated the necessity of improving the corrosion resistance of bundle materials.

Keywords: Hydrogen Production, Thermochemical Process, IS Process, Pervaporation, HIx Solution

This work was performed by joint research with Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

*1 Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries Ltd. (On loan to JAEA, Nuclear Applied Heat Technology Division, till March 2007)

*2 Nuclear Fuel & Back-End Systems Designing Department, Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. PV法の輸送現象	2
2.1 PV法の原理	2
2.2 PV法の輸送方程式	2
2.3 2成分系の分離	4
3. プロセスの検討	8
3.1 PV膜を用いたHI濃縮系の機器構成	8
3.2 熱物質収支	8
3.3 膜面積	9
3.4 EED法とPV膜法の比較	10
4. 機器成立性の検討	16
4.1 設計条件	16
4.2 PVモジュール	16
4.3 PVユニット	18
5. PVモジュールの耐食性検討	20
5.1 室温試験	20
5.1.1 供試材	20
5.1.2 浸漬試験	22
5.1.3 試験結果	22
5.2 高温試験	25
5.2.1 供試材	25
5.2.2 浸漬試験	28
5.2.3 試験結果	28
5.3 今後の課題	30
6. まとめ	31
謝辞	31
参考文献	32

Contents

1.	Introduction	1
2.	Transport Phenomena in PV	2
2.1	Principle of PV	2
2.2	Transport Equation of PV	2
2.3	Separation in two component system	4
3.	IS Process Featuring PV System	8
3.1	HI Concentration System Using PV	8
3.2	Process Heat Mass Balance	8
3.3	Membrane Area	9
3.4	Comparison with EED System	10
4.	Conceptual Design of PV Components	16
4.1	Design Condition	16
4.2	PV Module	16
4.3	PV Unit	18
5.	Corrosion Resistance of PV Module	20
5.1	Room Temperature Immersion Test	20
5.1.1	Test Pieces	20
5.1.2	Immersion Test	22
5.1.3	Results	22
5.2	High Temperature Immersion Test	25
5.2.1	Test Pieces	25
5.2.2	Immersion Test	28
5.2.3	Results	28
5.3	Concluding Remarks	30
6.	Summary	31
	Acknowledgements	31
	References	32

1. はじめに

水素を製造する有望な方法として、高温ガス炉から得られる 1000°C以下の核熱を用いて水を分解して水素を製造する熱化学水素製造法、具体的には、硫黄とヨウ素を循環物質とする IS(Iodine-Sulfur)プロセスの開発研究が、各国で、活発に進められている。原子力機構では、すでに、IS プロセスの基本反応及び分離操作を組み合わせた実験室規模及びベンチ規模の水素製造実験を行い、反応に関与する硫酸やヨウ素などの循環物質をほとんど損なうことなく連続的に水を分解できることを実証している。¹⁾

IS プロセスにおいて、HIx 溶液 (HI-I₂-H₂O 溶液) からヨウ化水素 (HI) を分離する工程は、水素製造の熱効率及び設備費の観点から非常に重要な工程であり、多くの研究が行われている。我々は、電解電気透析 (以下、EED と略す) による濃縮と蒸留によるヨウ化水素分離を組み合わせたシステムの技術開発を進めるとともに、抜本的な改良を達成できる新たな技術の探索研究を行っている。

本研究では、新技術探索の一環として、EED 同様、分離膜を用いる技術であり、濃縮の駆動力として電力ではなく透過蒸気成分の圧力差を利用するパーバレーション (以下、PV と略す) について、IS プロセスパイロットプラント試験装置への適用性を評価する目的で、熱効率や設備規模、及びプロセス環境における素材の耐食性を検討した。

具体的には、PV 法による 30m³/h 規模の IS プロセス水素製造試験装置の系統構成案を構築して、その熱物質収支を解析し、EED 方式との比較検討を行った。また、熱物質収支解析結果をもとに、PV 機器 (PV ユニット) の出入口条件を定め、ユニット構造の概念検討を行った。あわせて、IS プロセス環境は腐食性が強いことを考慮して、ユニットを構成するモジュールのプロセス環境における耐食性を検討するため、市販されている Nafion 中空糸膜モジュールを調査し、その構成材料に対する HIx 溶液への浸漬試験を実施した。

本報告は、日本原子力研究開発機構と三菱重工業株式会社との共同研究として行ったこれらの検討の結果をとりまとめたものであり、次の構成とした。第 2 章に PV 法における輸送現象に関する一般的知見を整理し、以下、第 3 章では PV 法を組み込んだ IS プロセスの系統構成及び熱物質収支推算結果を、第 4 章では機器構造の検討結果を、第 5 章では市販モジュール材料の耐食性評価結果を、記述した。

2. PV法の輸送現象

2.1 PV法の原理

PV法では、膜を通して液相から気相に相変化させ物質を移動させる。このため、蒸発潜熱が必要となるが、膜の透過選択性により物質分離を実現することが可能となる。同じ膜を用いたPV法、蒸気透過法、逆浸透法の性能（分離係数）を比較すると、PV法が最も優れていることが指摘されている。²⁾

図 2.1.1 に、PV法における輸送現象の概念を示す。フィード側の溶液は、以下の過程を経て、透過側に輸送される。

- ① フィード側の溶液がPV膜に移動。
- ② 膜内の液相部を拡散しながら移動。駆動力は膜内の濃度差（濃度勾配）である。
- ③ 膜内の液相 - 気相境界において蒸発。気相側は液相側境界条件での飽和蒸気圧となる。
- ④ 蒸気として膜内の気相部を拡散しながら移動し、透過側に到達。駆動力は③の気液境界部の圧力と透過側圧力との差である。透過側を真空引きする場合は、この拡散速度が律速になることはないと考えられる。

2.2 PV法の輸送方程式

① 膜内の拡散

PV法における物質輸送は、一般に、膜内の溶液拡散が律速になると考えられ、膜内圧力が供給側 P_1 から透過側 P_2 まで直線的に変化すると仮定すると、透過流速 J は次式で表される。²⁾

$$J = \frac{D \cdot C_m}{l} \frac{v}{RT} \frac{(P_1 - P_2)}{1 - \exp\left(-\frac{v(P_1 - P_2)}{RT}\right)} \left\{ x_{m1} - x_{m2} \exp\left(-\frac{v(P_1 - P_2)}{RT}\right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 J : 透過流速 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)

D : 拡散係数 (m^2/s)

C_m : 膜中モル濃度 (mol/m^3)

v : モル体積 (m^3/mol)

R : 気体定数 (J/mol K)

T : 温度 (K)

P : 圧力 (Pa)

x : モル分率 (-)

添え字

1 : 供給側

- 2 : 透過側
 m : 膜内
 s : 膜外 (溶液又はガス)

② 膜表面の平衡関係

a. 供給側

供給液の濃度 x_{s1} と膜表面の濃度 x_{m1} の関係は次式で表せる。

$$x_{m1} = \frac{\gamma_{s1} \cdot x_{s1}}{\gamma_m} \quad (2)$$

ここで、 γ_m : 膜内の活量係数
 γ_s : 膜外の活量係数

b. 透過側

同様に、透過側蒸気の濃度 x_{s2} と膜表面の濃度 x_{m2} の関係は次式となる。

$$x_{m2} = \frac{P_2 \cdot x_{s2}}{P_v \cdot \gamma_m} \exp\left(\frac{v(P_v - P_2)}{RT}\right) \quad (3)$$

ここで、 P_v : 供給液の飽和蒸気圧(Pa)

③ 輸送方程式

上述(2)式及び(3)式を(1)式に代入して、PV膜の輸送方程式を得る。

$$J = \frac{D \cdot C_m}{l \cdot \gamma_m} \Phi \left(\gamma_{s1} x_{s1} - \frac{P_2 \cdot x_{s2}}{P_v} \exp\left(\frac{v(P_1 - P_2)}{RT}\right) \right) \quad (4)$$

ここで、

$$\Phi = \frac{v}{RT} \frac{P_1 - P_2}{1 - \exp\left(\frac{v(P_2 - P_1)}{RT}\right)}$$

これまでに試みられた多くの PV 操作条件は、 $v \cong 10^{-5} (\text{m}^3 \text{mol}^{-1})$ 、 $P_1 \cong 10^5 (\text{Pa})$ 、 $T \cong 400 (\text{K})$ であり、透過側を真空条件 ($P_2=0$) とすると、

$$\exp\left(\frac{v(P_2 - P_1)}{RT}\right) \cong 1 - \frac{v \cdot P_1}{RT}$$

となり、透過流速 J は以下の式に近似できる。

$$J = \frac{D \cdot Cm}{l \cdot \gamma m} \cdot \gamma s_1 \cdot x s_1 \quad (5)$$

2.3 2成分系の分離

① 分離係数 α

PV 膜を介して、A、B の 2 成分がそれぞれ供給側（圧力 P_1 ）から透過側（圧力 P_2 ）にそれぞれ透過流速 J_A 、 J_B で移動している状態を考える（図 2.3.1）。供給側、透過側それぞれの成分 A のモル分率を $x s_{1A}$ 、 $x s_{2A}$ とすると、成分 B のモル分率はそれぞれ、 $(1 - x s_{1A})$ 、 $(1 - x s_{2A})$ であるので PV 膜による分離係数 α_{AB} は次式で定義される。

$$\alpha_{AB} = \frac{\frac{x s_{2A}}{(1 - x s_{2A})}}{\frac{x s_{1A}}{(1 - x s_{1A})}} \quad (6)$$

図 2.3.1 より、透過側の濃度比は透過流速の比と同じとなる。

$$\frac{x s_{2A}}{(1 - x s_{2A})} = \frac{J_A}{J_B} \quad (7)$$

したがって分離係数 α_{AB} は、

$$\alpha_{AB} = \frac{J_A}{J_B} \bigg/ \frac{x s_{1A}}{(1 - x s_{1A})} \quad (8)$$

で与えられる。

② 透過側を真空引きした場合の分離係数

透過側を真空にしたときの透過流速は(5)式で表せるので、これを(8)式に代入すると分離係数 α_{AB} は以下のとおりとなる。

$$\alpha_{AB} = \frac{\frac{D_A \cdot Cm_A}{l \cdot \gamma m_A} \cdot \gamma s_{1A} \cdot x s_{1A}}{\frac{D_B \cdot Cm_B}{l \cdot \gamma m_B} \cdot \gamma s_{1B} \cdot x s_{1B}} \bigg/ \frac{x s_{1A}}{(1 - x s_{1A})}$$

$$= \frac{\frac{D_A \cdot Cm_A}{l \cdot \gamma m_A} \cdot \gamma S_{1A}}{\frac{D_B \cdot Cm_B}{l \cdot \gamma m_B} \cdot \gamma S_{1B}} \quad (9)$$

$$= \frac{D_A \cdot Cm_A}{D_B \cdot Cm_B} \cdot \frac{\gamma S_{1A} / \gamma m_A}{\gamma S_{1B} / \gamma m_B} \quad (10)$$

(9)式における $D \cdot Cm / l \cdot \gamma m$ は、Nafion 膜やセロハン膜を用いた水-エタノール系の分離において評価された例がある。水-HI 系の α_{AB} も同様の考え方で推算可能と考えられる。ただし、 γ_s の推算、及び、水-HI-I₂ の 3 成分系については、評価方法の構築から検討を進める必要がある。

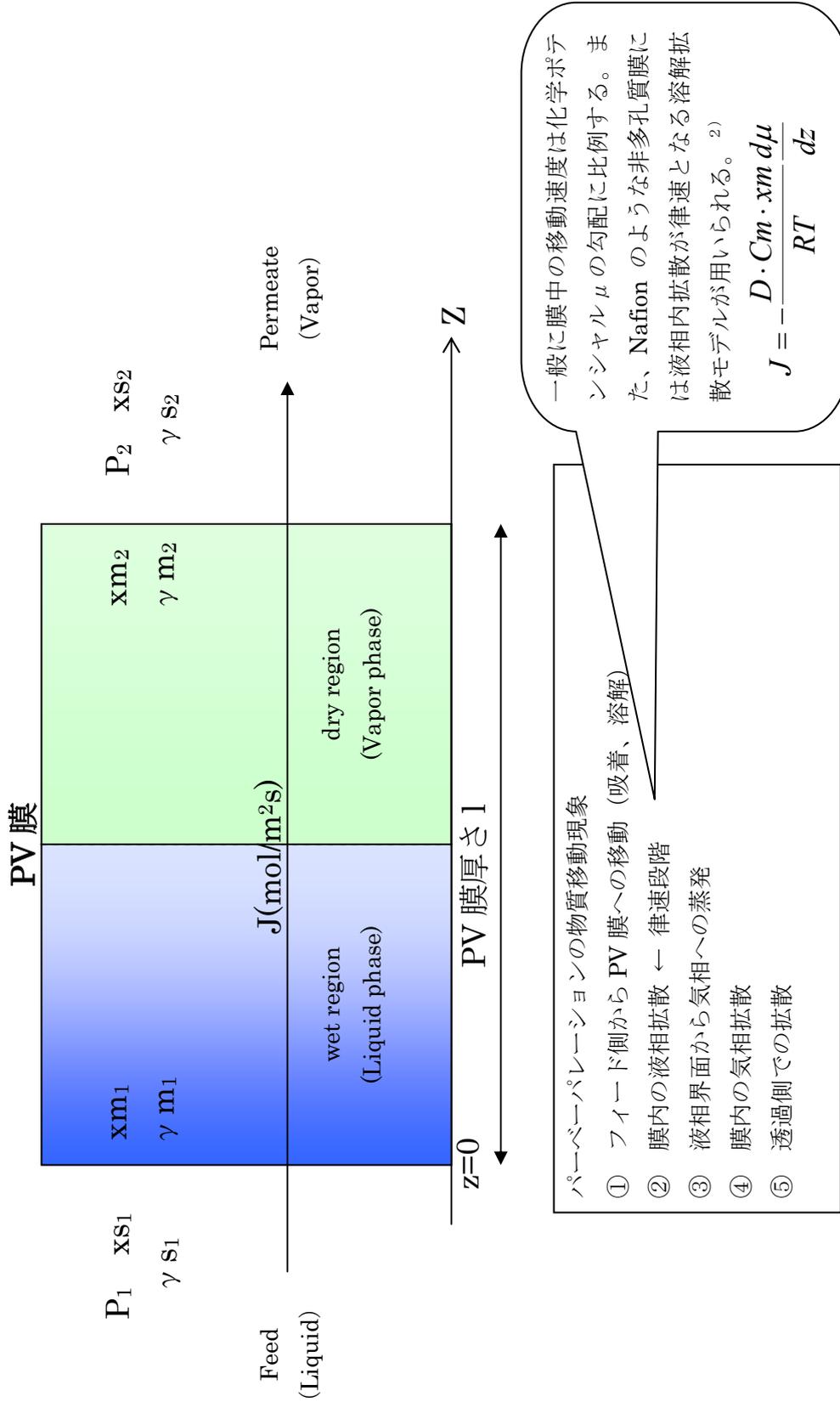


図 2.1.1 パーバレーションの輸送現象概念

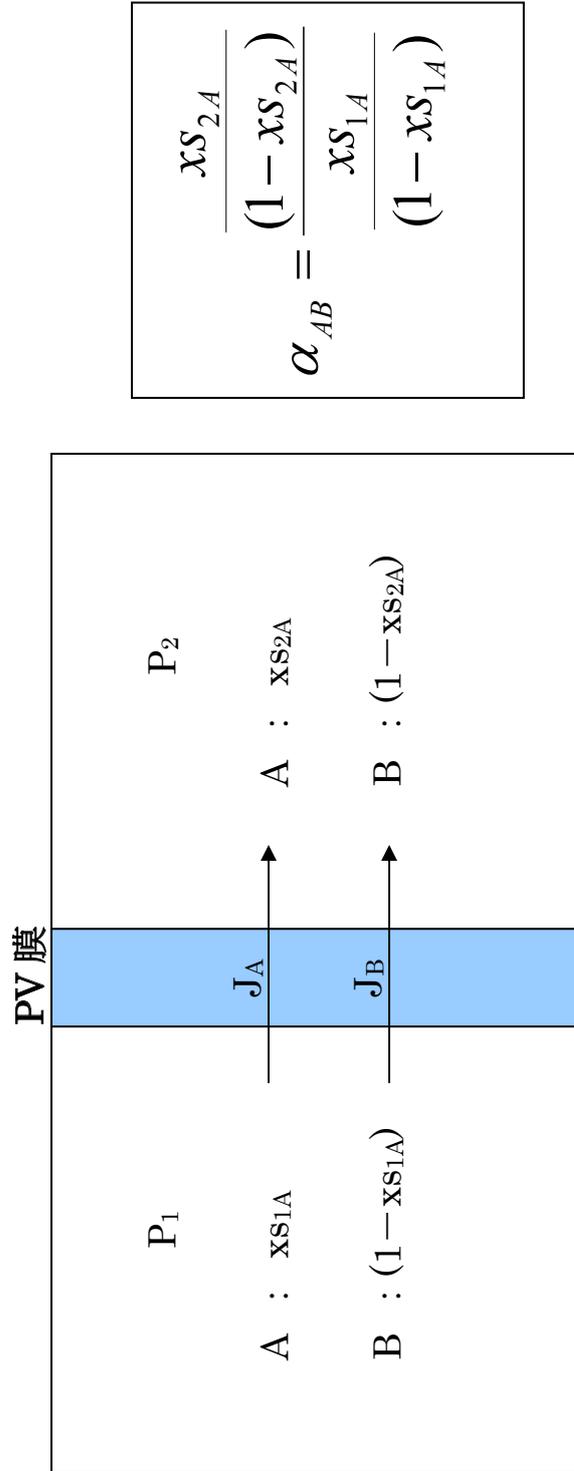


図 2.3.1 パーバーパーレーション膜による 2 成分系の分離操作の概念

3. プロセスの検討

3.1 PV膜を用いたHI濃縮系の機器構成

PV膜を用いた減圧法によるHI濃縮系の機器構成案を図3.1.1に示す。PV濃縮器は、EED濃縮器の代替として、HI蒸留塔の上流に設置する。PV濃縮器は、ブンゼン工程から供給される約160℃のHIx溶液を処理して、PV膜を通して水分のみを分離し、HIx溶液を擬共沸濃度以上に濃縮する機能を有する。PV膜の裏面は真空ポンプにより負圧に維持され、PV膜を通った水分は瞬時に蒸発する。このとき蒸発潜熱が奪われるため、PV膜の温度はプロセス流体温度よりも低くなる。真空ポンプには、食品廃棄物等の真空乾燥で実績のある水エジェクタポンプを採用することとした。

真空ポンプに使用する水エジェクタポンプは、高圧の駆動水をノズルから噴出させ周囲の気体を巻き込んで排出する構造であり、駆動水を循環させるためのポンプが必要となる。次節の推算結果に示されるように、パイロット規模（水素製造量30m³/h）のプラントを考えると、ポンプ容量は約320L/hを要し、真空乾燥機の例³⁾から所要動力は約32kWと見積もられるが、これはEEDの所要電力と同程度である。なお、この動力分の発熱及び水蒸気が液体に戻るときの凝縮潜熱を除去する必要があるため、図3.1.1の水エジェクタの駆動水ラインに冷却器を追加する必要がある。

3.2 熱物質収支

静特性解析コードであるPRO-IIと物性評価コードのOLIを用いて、PV法を組み込んだISプロセスの熱物質収支を解析し、EEDを組み込んだISプロセスの熱物質収支と比較した。ここで、プラント規模として、水素製造量30Nm³/h規模（パイロットプラント規模）を設定した。

(1) EEDを組み込んだプロセス例（対照プロセス）

EEDを組み込んだISプロセスの基本構成案について、暫定的な操作圧力及び温度条件を定めて、熱物質収支を推算した。図3.2.1に、推算結果（主要な温度・圧力条件、プロセス流量、並びに、供給熱量、除熱量及び交換熱量）を示す。なお、この解析において、EEDからHI蒸留塔に送る濃縮HIx溶液（Rich側溶液）のHI質量モル濃度を、Nafion膜を用いた実験室規模のEED実験結果に基づいて、12.3 mol/kg-H₂Oとした。ここに示したプロセスの熱効率（水素高燃焼熱基準）は14%であった。

(2) PV膜を組み込んだプロセス例（その1）

前項のEEDを組み込んだプロセス構成から、EEDを削除し、代わりにPVを組み込んだ構成の熱物質収支を推算した。ここで、HIx溶液のPVについては実験データが少ないため、前項と同様の温度・圧力条件の下、EEDとほぼ同等のPV性能を仮定し

た。解析結果を図 3.2.2 に示す。前項に述べた EED プロセスの結果と比較すると、重液循環流量が増加するため、HI 精製塔への入熱が 189kW から 285kW に増大したことなどにより、熱効率は 12%に低下した。なお、PV 濃縮器には、主に水の蒸発熱として 62kW の熱量、また、約 32kW のポンプ動力（発電効率 50%として熱量換算 64kW）の投入が必要である。

(3) PV 膜を組み込んだプロセス例（その 2）

PV 濃縮器の性能を EED と同程度とした前項の解析では、重液循環量が増加し熱効率の低下につながった。そこで、PV 濃縮器の性能を高め、重液循環量を低減した効果を検討した。PV 濃縮器の出口濃度を 20 mol / kg-H₂O まで高めたケースの解析結果を図 3.2.3 に示す。精製塔 Duty が 140kW まで削減され、前項の結果に比べ熱効率は向上し、13%が得られた。しかし、濃縮度を大幅向上にもかかわらず効率向上はわずかであった。これは、PV 濃縮器で水を蒸発させるために投入する熱量が大幅に増加したためである。

ただし、PV 法では、操作温度が 110°Cと低いことから、これまで利用できなかったブンゼン反応器の放熱分を蒸発潜熱による液温低下の補償に利用できる可能性がある。例えば、PV 濃縮器に投入すべき 156kW の熱量をブンゼン反応工程（精製塔等）から回収・供給すると、熱効率は 16%に向上し、EED システムを上回る熱効率が得られる。

3.3 膜面積

HI(-I₂)-H₂O 系の PV における水透過流速に関し、これまで、液側圧力を常圧、透過側を回転ポンプで真空引きした実験により、以下の知見が得られている。

膜材質	水透過率*1)	溶液	reference
Nafion-117	16~56	HI-H ₂ O [20~56wt%, 室温]	小貫 ⁴⁾
PTFE	20~77	同上	同上
セレミオン他*2)	0.6~22	HI-I ₂ -H ₂ O [2/1/10(mol 比), 室温]	野村ら ⁵⁾
Nafion-117	28~58	HI-H ₂ O [20~45wt%, 100°C]	Stewart ら ⁶⁾
Nafion-117	3~19	HI-H ₂ O [50~66wt%, 109°C]	同上

*1) 単位は mol/m²/h

*2) セレミオン CMV, APSIII-0, AMV（以上、旭硝子(株)）、Nafion-117（Dupon）、ネオセプタ CMH, AMH（以上、トクヤマ(株)）、TOSFLEX IE-DF34（東ソー(株)）の各種膜を試験した。

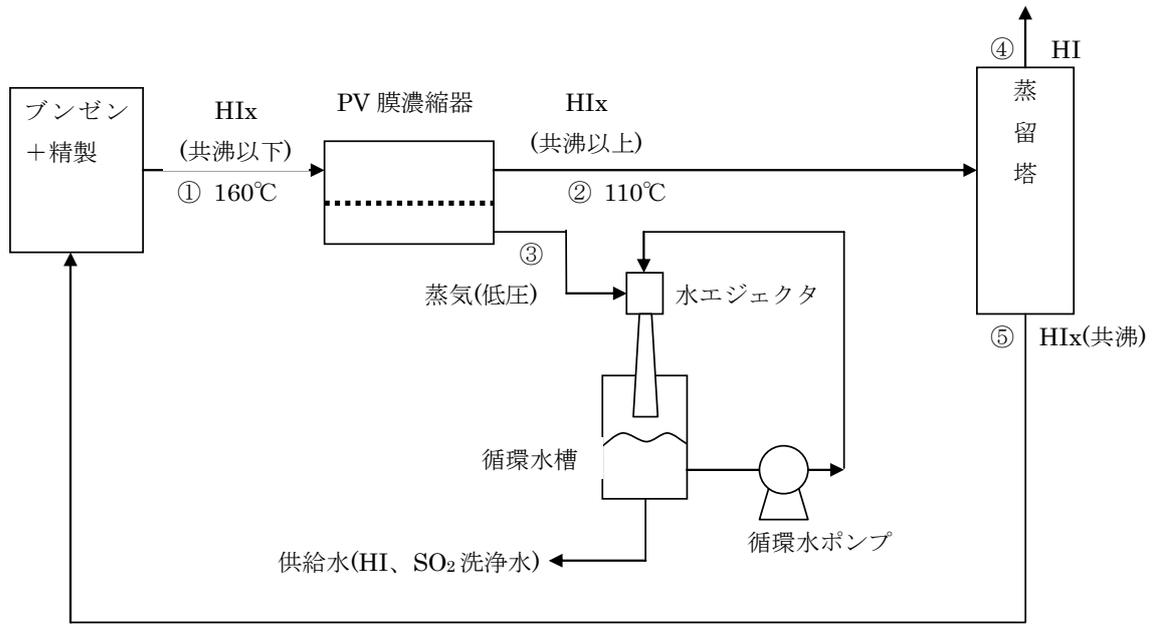
これらの試験における水透過率は、膜の材質、試験液組成、温度などの試験条件が異なることもあり、かなりばらついているが、本検討では、目安として、 $5\sim 50 \text{ mol/m}^2/\text{h}$ を用いることとした。この水透過率を用いて、前節で推算したパイロット規模の水素製造試験装置における水処理速度 $18,000 \text{ mol/h}$ を得るために必要な膜面積を推算した結果、以下の値を得た。

所要膜面積 : $360\sim 3600 \text{ m}^2$

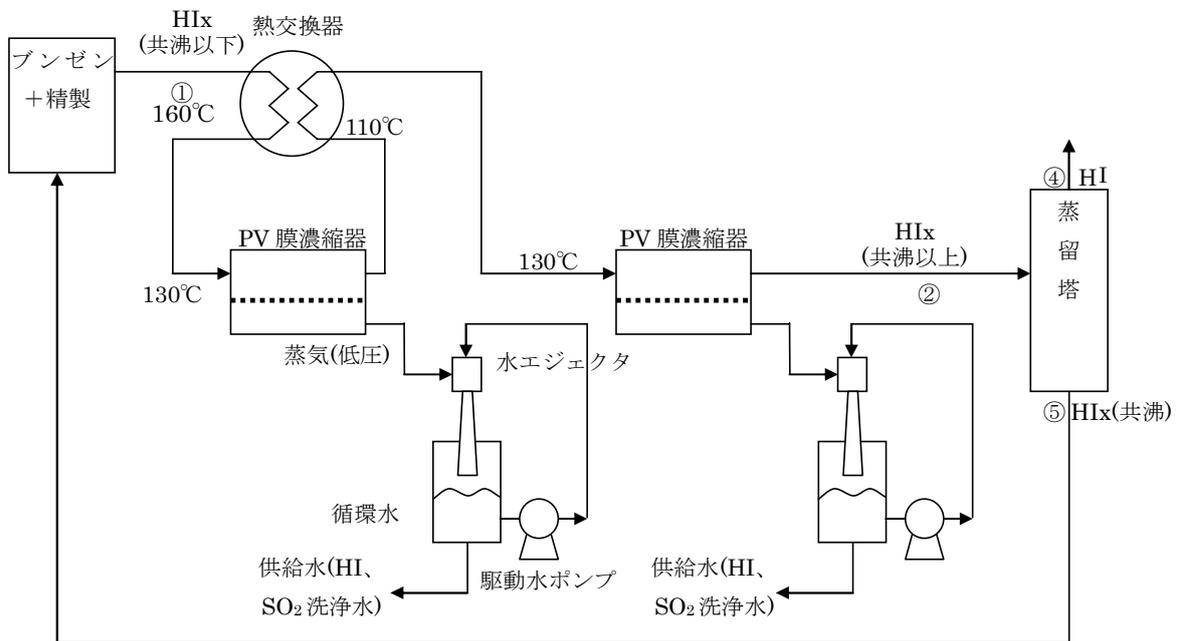
この値は、EED を用いた同等規模の水素製造プラントにおける EED 膜の所要面積に比べて数倍から数十倍大きい。しかし、PV 膜には中空糸が使用できること、及び電極が不要なことから、装置としては EED に比べて大幅なコンパクト化の実現可能性がある。この点は次章で検討する。なお、普及版膜処理技術⁷⁾には、 500m^2 の PV 膜モジュールが製作可能との記載がある。

3.4 EED 法と PV 膜法の比較

以上の検討結果を、EED 法と比較して、表 3.4.1 にまとめる。PV 法は、水分蒸発が伴うため、相変化のない EED 法に比べてプロセス熱効率は低い(所要エネルギーが大きい)。ただし、前段にある精製塔の入熱やブンゼン反応器の発熱分を蒸発潜熱に利用することなどにより、所要エネルギーを削減することができる。また、機器寸法や設備費の面では EED よりも有利になる可能性がある。



(1) PV 濃縮器 1 段の機器構成



(2) PV 濃縮器 2 段の機器構成

図 3.1.1 PV 濃縮器を用いた減圧法による HIx 濃縮系の機器構成案

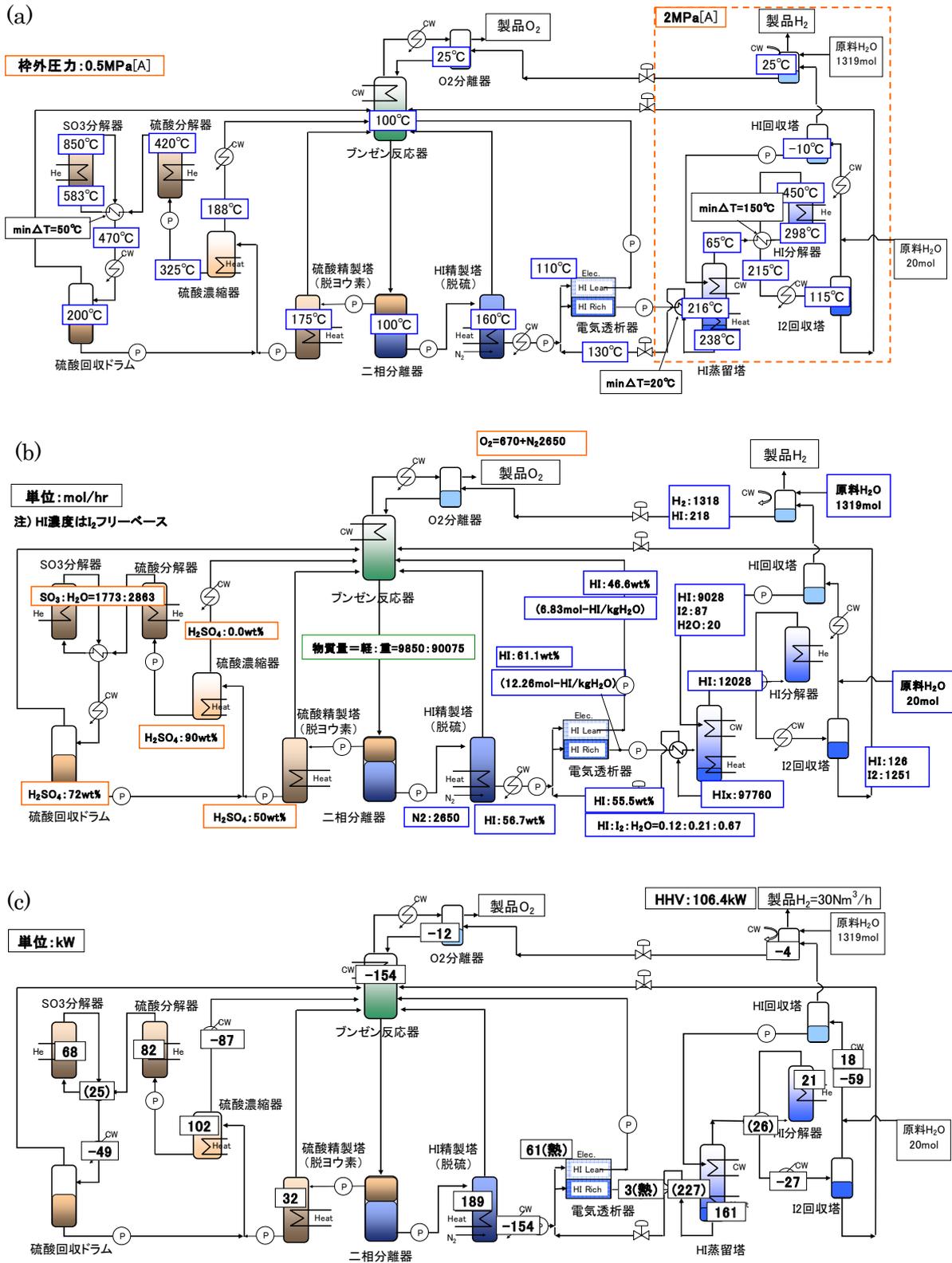


図 3.2.1 EED 濃縮器を用いた IS プロセスのフローシート例

(a) 温度・圧力条件、(b) 物質収支、(c) 熱収支

注: (c)図で、”数値(熱)”は所要動力の熱量換算値(効率 50%)、”数値)”は交換熱量を表す。

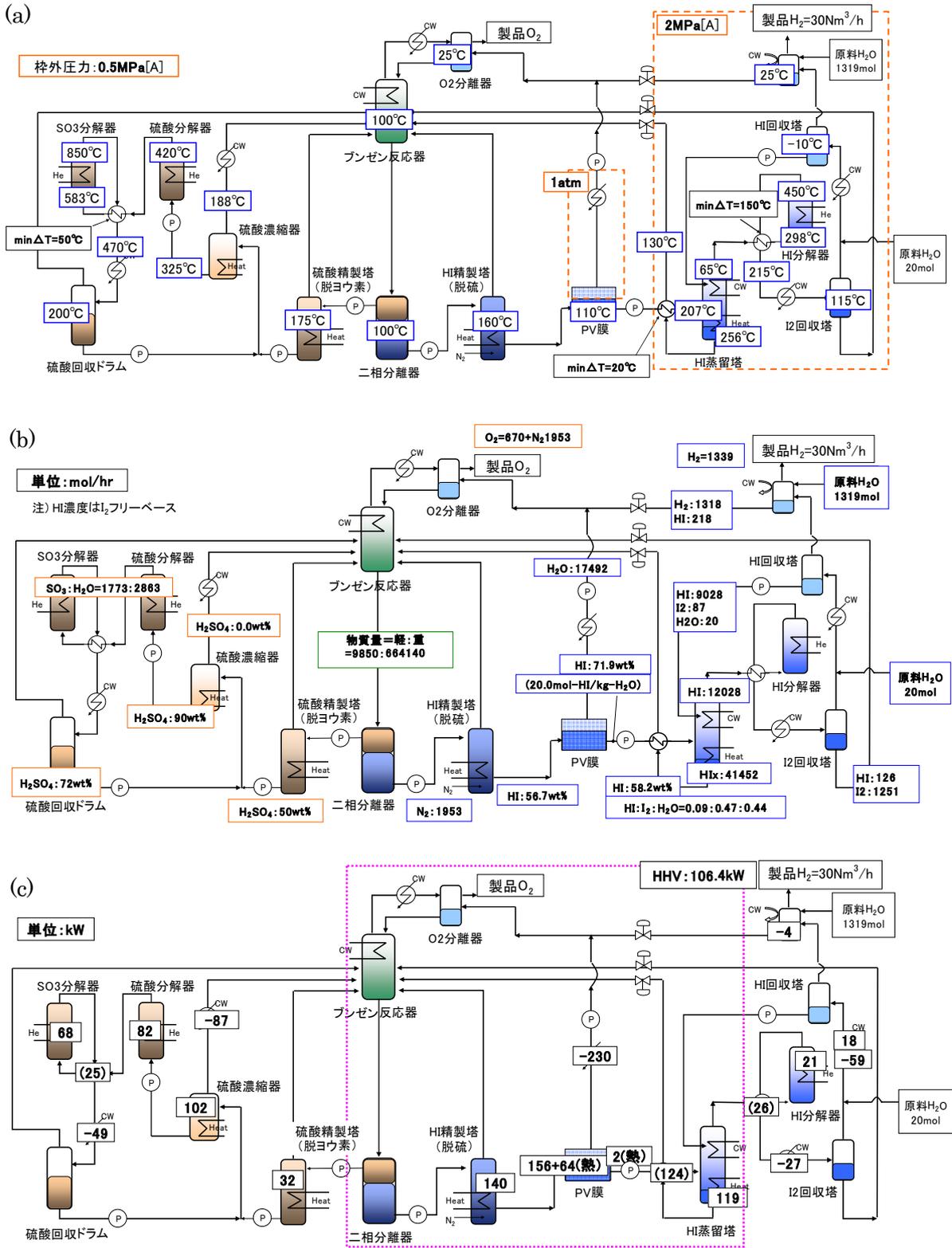


図 3.2.3 PV濃縮器を用いたISプロセスのフローシート例 (その2)

(a) 温度・圧力条件、(b) 物質収支、(c) 熱収支

注: (c)図で、”数値(熱)”は所要動力の熱量換算値(効率50%)、”数値)”は交換熱量を表す。

表 3.4.1 EED 法と PV 法の比較

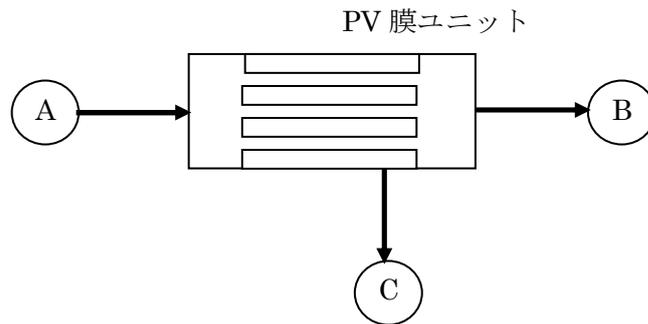
No	項目	EED 法の評価	PV 法の評価	比較	備考
1	プロセス効率への寄与 (所要エネルギー)	<ul style="list-style-type: none"> 所要電力 50～70kW + 液送ポンプ動力 	<ul style="list-style-type: none"> 真空ポンプ 50kW + 液送ポンプ動力 + 蒸発潜熱 1)300kW 	EED ¹⁾	PV 膜法の HI 蒸留塔リボイラの熱量を評価し比較する必要がある。
2	機器の成立性 (現状の開発段階)	<ul style="list-style-type: none"> 膜性能評価中の段階 	<ul style="list-style-type: none"> INL で膜性能評価中の段階。共沸を越える濃縮可能と報告。 HI 精製塔の熱を有効利用するシステムの開発、バンドル部の耐食・耐熱構造、膜の耐圧性能等の確認が必要。 	同等	両者ともラボレベルでの試験段階にあると考えられる。
3	機器寸法	<ul style="list-style-type: none"> 本体は平膜スタック構造となり寸法大。 電源装置等周辺機器も大きくなる傾向。 	<ul style="list-style-type: none"> 本体は中空糸バンドル構造を採用し小型化可能。 真空ポンプ等周辺機器も数m四方程度。 	PV	
4	設備費	<ul style="list-style-type: none"> 高くなる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 機器が小型化できる点、周辺装置が単純な真空ポンプとできる点から大幅に圧縮できる可能性がある。 	PV	

注 1) PV 法では、HI 精製塔への入熱、ベンゼン反応器の放熱を有効利用できれば、大幅な効率改善が可能。

4. 機器成立性の検討

4.1 設計条件

PV モジュールを組合せた PV ユニットの仕様を決定するため、ユニット出入口の HI 溶液の条件を整理した。装置規模はパイロット規模とし、図 3.2.2 に示す系統（PV 出口の濃縮液の HI 質量モル濃度を 13.5 mol / kg·H₂O とするケース）とした。PV ユニット出入口のプロセス流体の条件の概略を図 4.1.1 に示す。1 時間当たりの水分除去量は 17679 モル×18g/モル= 318kg である。



場所		A	B	C
相状態		液体	液体	蒸気
温度 (°C)		160	110	110
圧力 (MPaA)		0.5	0.5	0.1013
組成 (mol/h)	HI	13,447	13,447	0
	I ₂	39,597	39,597	0
	H ₂ O	72,971	55,292	17,679
合計(mol/h)		126,016	108,337	17,679

図 4.1.1 PV ユニット 出入口条件

4.2 PV モジュール

前節の考察から、PV ユニットは、17679 モル/h (318kg/h) の水分除去性能を必要とする。PV による水分除去装置として、Nafion 膜モジュールを調査し、燃料電池の加湿用として市販されているモジュール（Perma Pure 社製、燃料電池用加湿器 FC シリーズ）の利用を検討することとした。本機器は、1 モジュールのサイズが非常に小さく、内蔵する Nafion 中空糸の膜面積が、非常に大きい。市販品のうち、最もサイズが大きく、内蔵する Nafion 中空糸の本数が多いタイプを検討対象として選定した。本タイプの 1 モジュールに関する主要仕様は、以下の通りである。

中空糸本数 7000 本

長さ	356mm(14 インチ)
外径	1.07m
膜面積	7.95m ²

モジュールの外形及び主要寸法を図 4.2.1 に示す。⁸⁾

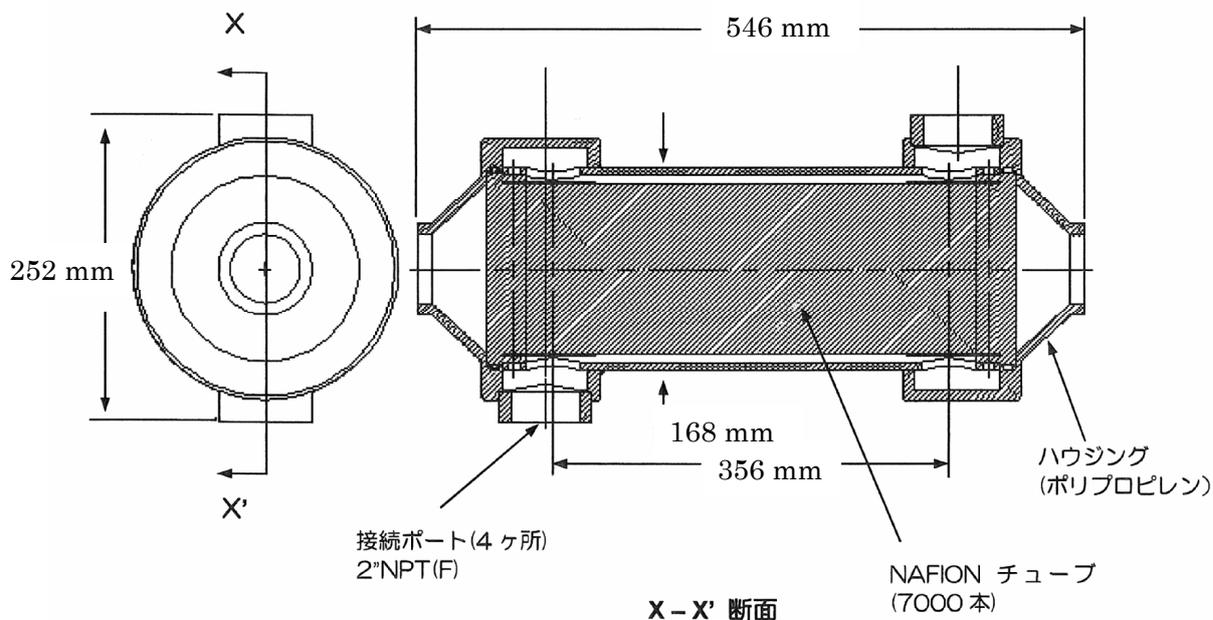


図 4.2.1 PV モジュール外形図

水の透過流速として、2.3 節に述べた HI-H₂O 系における Nafion-117 膜の透過流速実測値 16~56 mol/m²/h の平均値、36(=(16+56)/2)mol/m²/h、を採用した。

本膜透過流速と上記の PV ユニットの緒元より、プラントに必要な PV モジュールの個数を見積もった。結果を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 パイロットプラントに必要な PV モジュール数

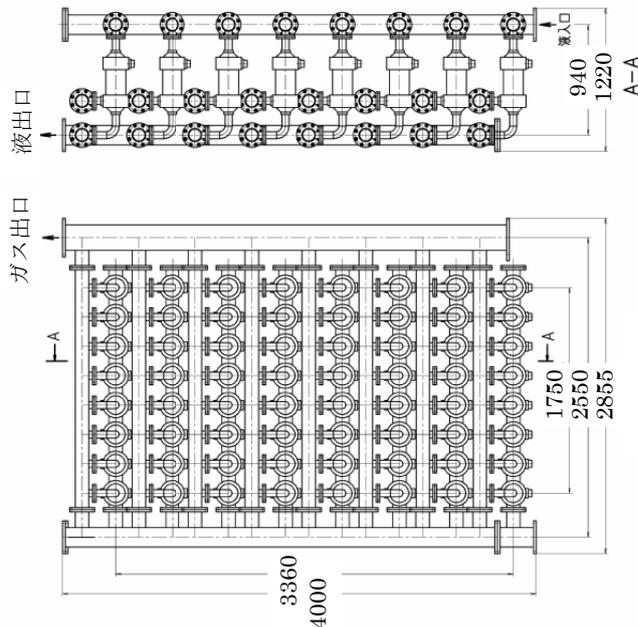
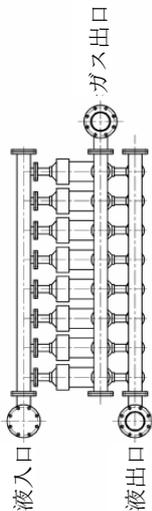
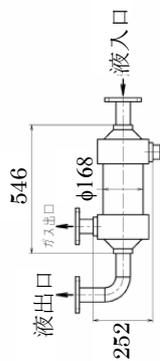
単位面積水透過量(mol/m ² /hr)	36
必要透過水量(mol/hr)	17500
必要面積(m ²)	486
1 モジュールの膜面積(m ²)	7.95
必要個数	62

4.3 PV ユニット

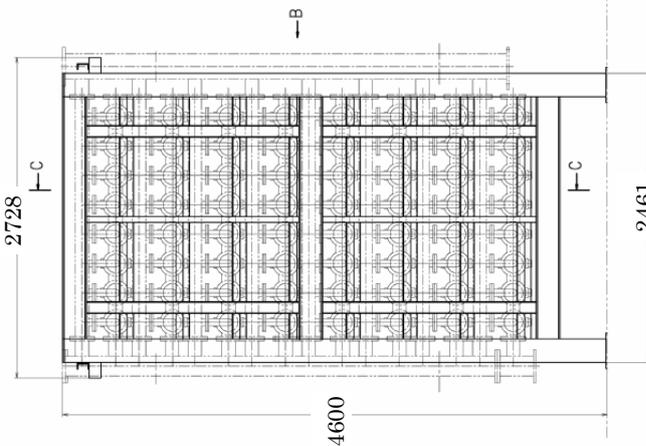
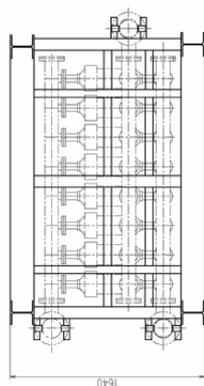
前節の検討で求めた PV モジュール 62 個から構成される PV ユニットの構造を検討した。モジュールの必要個数は 62 であるが、8×8 の構成、および余裕を考慮し、64 個組みとした。図 4.3.1 に、64 個組の PV ユニットの概念図を示す。図に見られるように、中空糸モジュールを採用することにより、コンパクトな装置構成とすることができた。

上記検討では、市販品サイズをベースにユニット構成を検討した。しかし、1 個の PV モジュールをさらに大型化することも可能であり、これにより、ユニット全体のサイズを一層コンパクト化することが可能であろう。

単位：mm



機器外形図



架台B

C-C

架台外形図

図 4.3.1 PVユニット外形図

5. PV モジュールの耐食性検討

PV モジュールの IS プロセス環境における耐食性を評価するため、候補材料の室温 H₂SO₄ 溶液への浸漬試験、及び、高温溶液への浸漬試験を行った。供試材は、前章に述べた Nafion 中空糸膜モジュール市販品の主要構成材料とした。

5.1 室温試験

5.1.1 供試材

Nafion 膜モジュール (Perma Pure 社製、燃料電池用加湿器 FC-125-5PP) の接液部材。中空糸の両端を固定するとともに液とガスを分かつバンドル部 (材質: ポリウレタン)、バンドルカバーメッシュ (材質: ポリプロピレン)、中間胴 (材質: ポリプロピレン)、バンドルホルダー (材質: ポリプロピレン)、及び、本体カバー (材質: ポリプロピレン) から、試験片を切り出して、浸漬試験に供した。

膜モジュールからの試験片切り出しは小型バンドソーによって行った。

写真 5.1.1 から写真 5.1.3 に、切り出し状況、及び、試験片の外観を示す。



写真 5.1.1

試料切り出し。

小型のバンドソーにより、バンドル部の切り出し中。



写真 5.1.2

切り出し後の PV 膜モジュール各部。

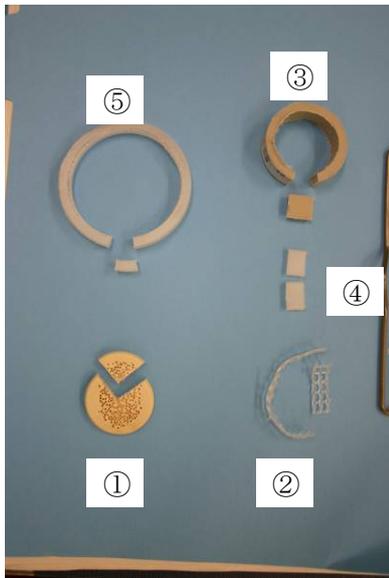


写真 5.1.3

サンプルの切り出し。

- ① バンドル部
- ② バンドルカバーメッシュ
- ③ 中間胴
- ④ バンドルホルダー
- ⑤ 本体カバー

5.1.2 浸漬試験

(1) 試験液

浸漬試験に使用した試験液組成を表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 室温試験 試験液組成

試験液組成	
HI	17.7 wt%
I ₂	69.4 wt%
H ₂ O	12.9 wt%

(2) 試験温度と時間等

試験温度は室温、浸漬時間は 19 時間とした。また、浸漬後のサンプルは、アルコール洗浄を行った後、乾燥器により、60℃、1 時間の乾燥を行った。

5.1.3 試験結果

耐食性評価は、重量変化測定及び目視外観観察によって行った。浸漬試験前後のサンプル重量の測定結果を表 5.1.2 に示す。バンドル部以外のサンプルに、顕著な重量の変化は見られなかった。

なお、バンドル部の重量減少（約 10mg）は、試験片洗浄中、バンドル部に付着していた Nafion 中空糸が脱落、流失してしまったことによるものであり、腐食によるものではない。

表 5.1.2 室温耐食試験結果(重量変化)

試料 No	名称	試料重量 (g)	
		試験前	試験／乾燥後
1	バンドル部	0.8712	0.8611
2	バンドルカバーメッシュ	0.0516	0.0516
3	中間胴	0.4928	0.4929
4	バンドルホルダー	0.263	0.2629
5	本体カバー	0.2948	0.2948

写真 5.1.4 から写真 5.1.10 に、試験状況、および試験後の各試料の状況を示す。外観に特段の変化は認められなかった。

以上により、これらすべての材料は、室温 HIx 溶液に耐えるものと判断し、高温(約 100℃)、長時間(約 100 時間)の浸漬試験に供することとした。



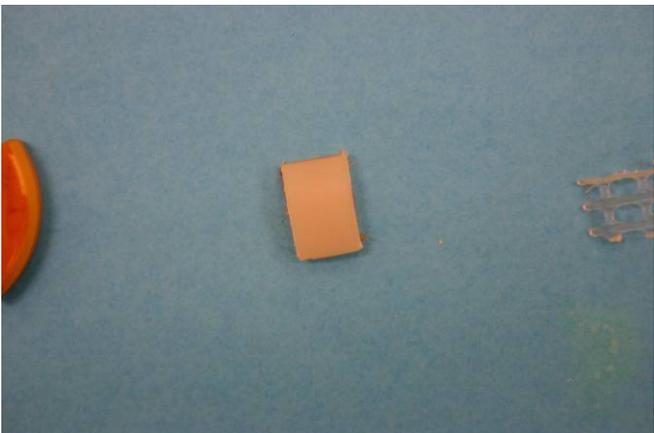
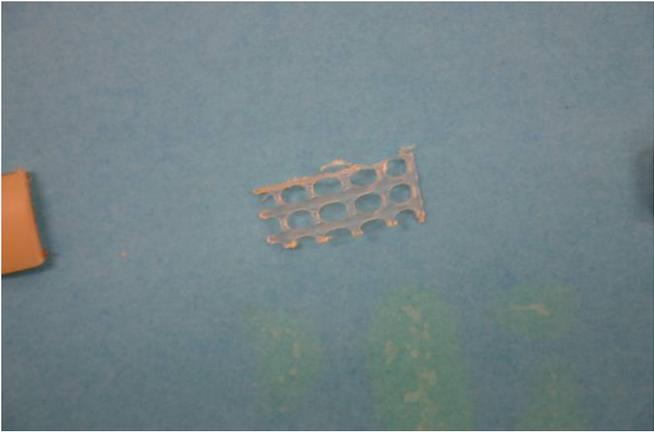
写真 5.1.4
HIx 溶液に浸漬中のバンドル部。
HIx 溶液の比重が重い
ため、サンプルは浮いてし
まう。

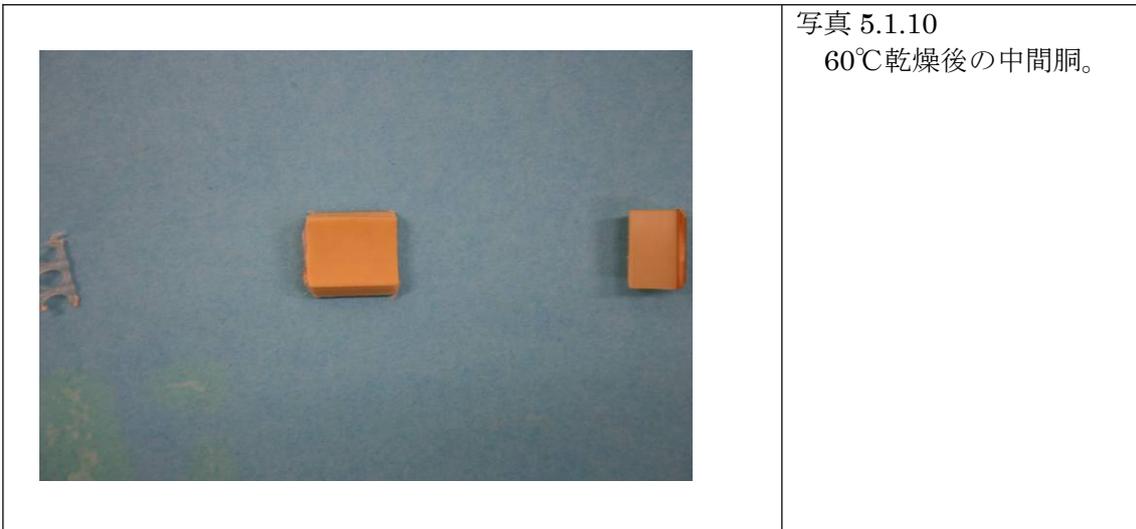


写真 5.1.5
HIx 溶液より取出し直
後のバンドル部とバンド
ルホルダー。



写真 5.1.6
アルコール洗浄後のバ
ンドル部。

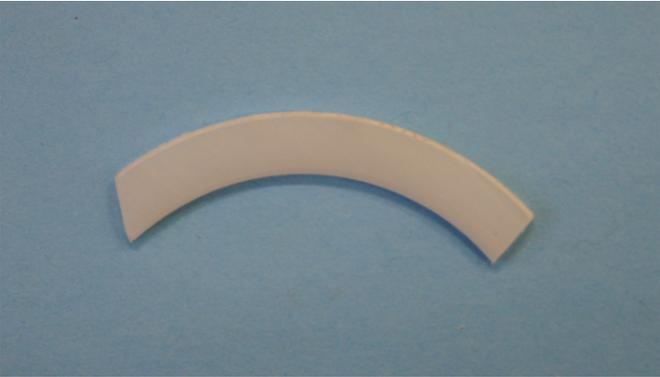
	<p>写真 5.1.7 60℃乾燥後のバンドル部。</p>
	<p>写真 5.1.8 60℃乾燥後の本体カバー。</p>
	<p>写真 5.1.9 60℃乾燥後のバンドルカバーメッシュ。</p>



5.2 高温試験

5.2.1 供試材

高温腐食試験の供試材は、室温試験と同一とした。試験片は、石英ガラスホルダーの形状に合わせて整形した。写真 5.2.1 から写真 5.2.3 に、切り出し状況を示す。また、写真 5.2.4 から写真 5.2.6 に、ホルダーへの試料の設置状況を示す。なお、バンドルカバーメッシュは、ラックからはずれにくい形状に整形した。(写真 5.2.4 参照)

	<p>写真 5.2.1 試料切り出し状況。</p>
	<p>写真 5.2.2 薄板状に切り出した本体カバー。</p>
	<p>写真 5.2.3 薄板状に切り出したバンドル部。</p>

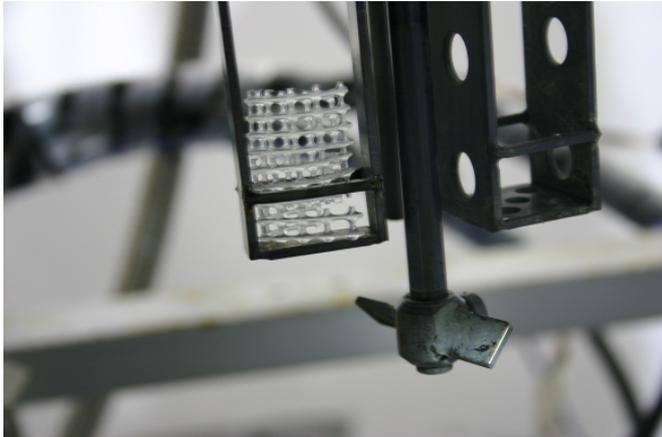


写真 5.2.4

整形後のバンドルカバーメッシュ。
サンプルラック取り付け確認中。



写真 5.2.5

切り出し後サンプルの、石英ガラスホルダー収納状況。

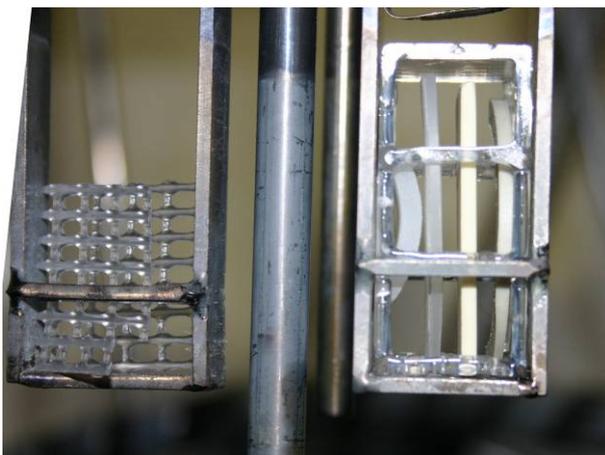


写真 5.2.6

試験開始前、サンプルラックに取り付けられたサンプル。

5.2.2 浸漬試験

(1) 試験液

試験に用いた溶液組成を表 5.2.1 に示す。

表 5.2.1 試験液組成

試験液組成	
HI	17.7 wt%
I ₂	69.4 wt%
H ₂ O	12.9 wt%

(2) 試験装置及び試験条件

試験は、高温高圧溶液用の腐食試験装置⁹⁾を用いて行った。試験開始前、試験容器内をカバーガスの Ar ガスでパージし、ガス置換を行った後 2MPa に加圧した。試験温度は 100℃とし、試験温度に到達後 88 時間保持した。

試験終了後、試験片は純水洗浄を行い、その後、乾燥器で 60℃にて乾燥を行った。

5.2.3 試験結果

浸漬試験前後のサンプル重量測定結果を表 5.2.2 に示す。試験後、バンドル部は溶失していた。他の試験片は、いずれも、60℃、1 時間乾燥時点で大きな重量増加（最大 20mg）が観察されたが、65 時間乾燥時点では重量増加量は減少した（最大 8mg）。これは、浸漬中にヨウ素が試験片に浸透し、乾燥につれて吸収されたヨウ素が逃散したためと考えられる。

表 5.2.2 高温耐食試験結果(重量変化)

試料 No	名称	試料重量 (g)		
		試験前	試験後 1hr 乾燥*	試験後 65hr 乾燥*
1	バンドル部	1.3327	溶失	同左
2	バンドルカバーメッシュ	0.3113	0.3170	0.3117
3	中間胴	0.3652	0.3879	0.3676
4	バンドルホルダー	0.4954	0.5157	0.5037
5	本体カバー	0.4828	0.5046	0.4880

*乾燥温度は 60℃

写真 5.2.7 から写真 5.1.10 に、試験後の各試料の状況を示す。乾燥後の試験片の外観は健全であった。

以上の結果、バンドル部は当該環境に全く耐食性を示さないが、他の材料は使用できる可能性があることが分かった。

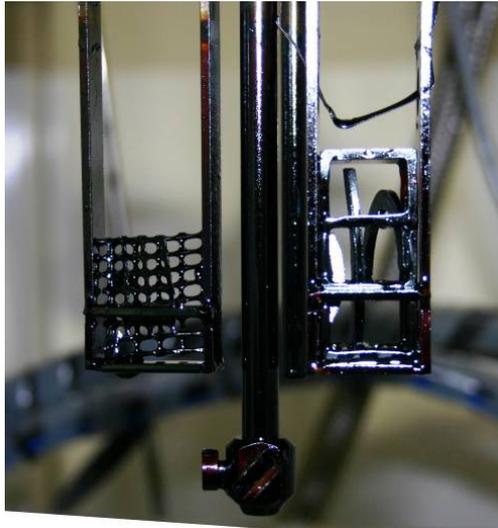


写真 5.2.7

試験後のサンプル。バンドル部のサンプルが溶失している。

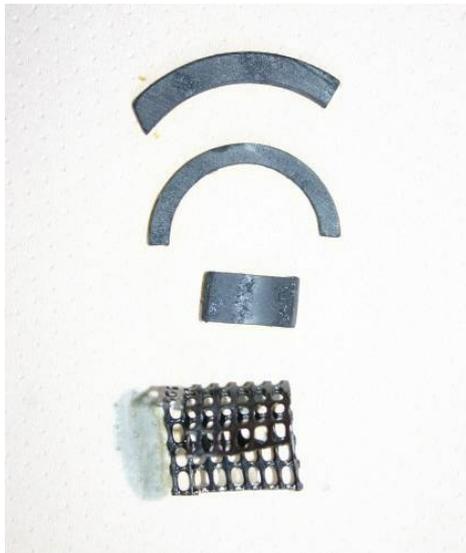


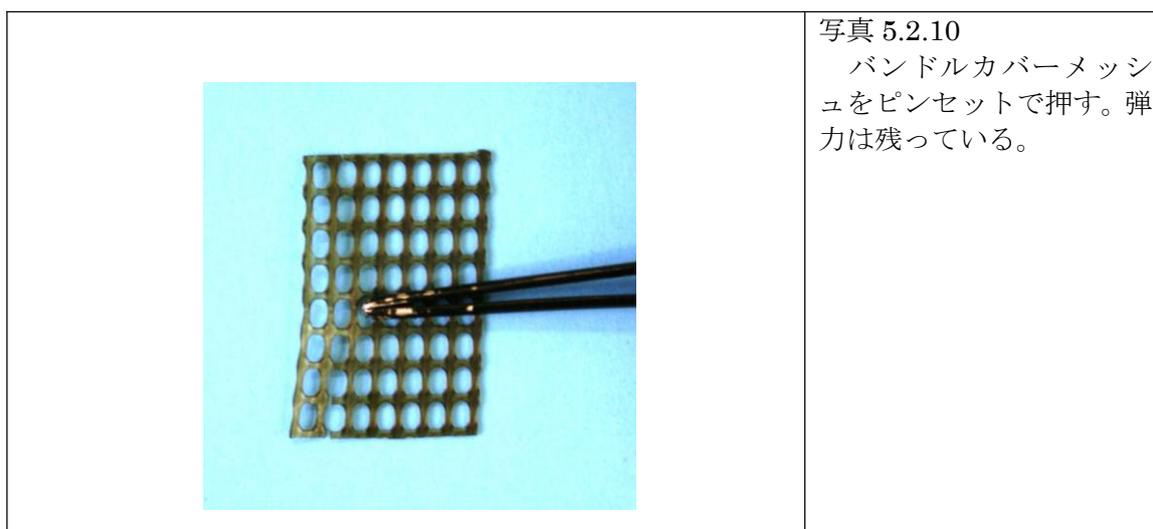
写真 5.2.8

水洗後のサンプル。ヨウ素と思われる付着物が見られる。



写真 5.2.9

60℃で 65 時間乾燥度のサンプル。
付着物は無くなっている。



5.3 今後の課題

市販 Nafion 中空糸膜モジュールを対象とした HIx 溶液浸漬試験の結果、膜モジュール構成材の一部、バンドル材が、高温の HI 溶液に対して耐食性を有しないことが判明した。バンドル部は、多数本の中空糸を束ねるものであり、この対策として、以下が考えられる。

- バンドル材の改良

現状のバンドル材から、HI 溶液に耐食性ある材料に変更する。

- モジュール構造の見直し(バンドル部の低温化、非接液化)

モジュール構造を、例えば、下記のように見直し、バンドル部の低温化、非接液化をはかる。(ガス相でのバンドル部耐食性の再確認が必要)

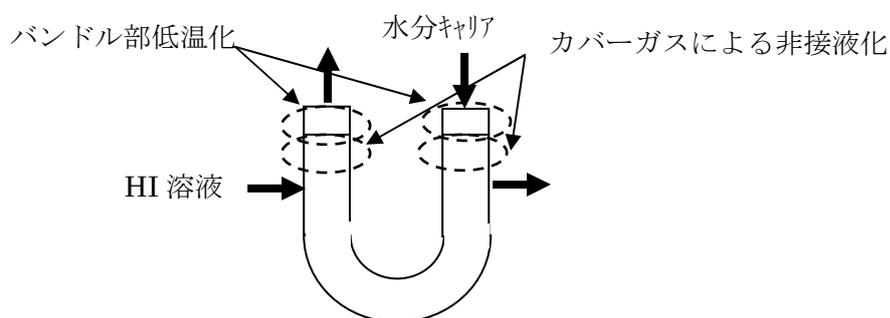


図 5.3.1 モジュール構造の見直し(案)

6. まとめ

IS プロセスは、高温ガス炉と組合せることにより、炭酸ガスを排出しない原子力による水からの水素製造を大規模に実現できる可能性を持ったきわめて有望な化学プロセスである。本研究では、IS プロセスパイロットプラント試験装置への PV 法の適用性について、水素製造プロセス効率、設備規模、入手可能な膜モジュールの耐食性などの観点から、予備的な検討を行った。

まず、PV 法を採用する場合の 30m³/h 規模の IS プロセスプラントのシステム構成を明らかにし、熱物質収支を求め、PV 法採用の効率への影響について検討を行った。HIx 溶液濃縮のレフアレンス方式として研究開発を進めている EED 法に比べ、PV 法は水蒸発を要するため、熱効率面でのメリットは見込めないものの、低温排熱の回収などにより、同等の効率が得られる可能性を見出した。一方、機器については、市販膜モジュールを基本単位とする構造の検討を行い、装置全体をコンパクトに構成することができ、設備コストを低減できる可能性を見出した。市販膜モジュールの耐食性に関して、構成材料について、室温での浸漬試験、及び高温での浸漬試験を実施した。今回の実験条件の範囲では、ほとんどのモジュール構成材料は健全であったが、バンドル材は耐食性のないことが判明した。今後、バンドル材の改良(代替材の選定)などにより、この課題を解決していく必要がある。

以上、IS プロセスへの PV 適用に関する予備評価を実施し、可能性、課題、解決案などを明らかにした。本研究の結果から、PV 法は、さらなる検討に値する方法と考えられるが、今後の検討においては、上述の課題に加えて、さらに、以下の項目の検討が必要と考えられる。

- ・ 耐圧性能、圧損（チューブの内外圧力差による膨張の影響）
- ・ 耐熱性
- ・ I₂、HI の影響（水の透過率、選択性）

謝辞

プロセス熱物質収支解析では伊地知雅典氏に、浸漬試験では諏訪博一氏に、それぞれ、ご尽力頂いた。また、浸漬試験に供した膜モジュール（Perma Pure 社製）は、代理店であるジャパンコントロールス株式会社より、ご提供頂いた。記して、謝意を表します。

参考文献

- (1) S. Kubo et al., A Demonstration Study on a Closed-Cycle Hydrogen Production by Thermochemical Water-Splitting Iodine-Sulfur Process, Nucl. Eng. Des., 233 (2004) 347-354.
- (2) 中尾, 木村, 膜の分離技術, 大日本図書 (1997).
- (3) 豊産業株式会社ホームページ (<http://www.yutakasangyou.co.jp/kankyoupage01.htm>).
- (4) 小貫, 私信 (1991).
- (5) 野村 他, 水の熱化学分解による水素の製造方法, 特願 2002-269660.
- (6) F.F. Stewart et al., Membrane Processes for the Sulfur-Iodine Thermochemical Cycle, Int. J. Hydrogen Energy, 32 (2007) 457-462.
- (7) 中垣 編, 普及版膜処理技術, フジ・テクノシステム(株), 1998, p.685.
- (8) ジャパンコントロールズ株式会社, 燃料電池用 Nafion チューブ加湿器 FC シリーズ カタログ.
- (9) N. Tanaka et al., Study on Corrosion Resistance of Glass Lining and Gold Plating in High Temperature Sulfuric Acid for Thermochemical Hydrogen Production IS Process, Proc. 15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), Nagoya, Japan, April 22-26, 2007, ICONE15-10331.

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
物質質量	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 ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
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	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	kg ⁻¹ ・m ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
光強度	カンデラ	cd		K
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
	シーベルト	Sv		s ⁻¹
				m ² ・s ⁻²
				m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘り	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), エントロピー (比エントロピー)	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量	グレイ	Gy	m ² ・s ⁻²
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
メートル系トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

