研究論文

LHD 型核融合発電炉による水素燃料の製造・輸送の研究

山田 修一^{*1,†}, 菱沼 良光^{*2}, 上出 俊夫^{*3}, 相良 明男^{*2}Study on Hydrogen Production and Transportation from Steam Electrolysis
in an LHD-type Fusion ReactorShuichi YAMADA^{*1,†}, Yoshimitsu HISHINUMA^{*2}, Toshio UEDE^{*3} and Akio SAGARA^{*2}

Synopsis: The design studies on the force-free helical-type fusion reactor (FFHR) have been carried out with collaborations between universities and the National Institute for Fusion Science in Japan. The output of the electric power was optimized to 1 GW. Co-generation of hydrogen and electricity by steam electrolysis was applied. One-hundred tons per day of liquid hydrogen and 824 MW of electricity can be produced during off-peak time. The applicability for a 1 GW-class hybrid energy transfer line of hydrogen and electricity was investigated. The target distance of the hybrid energy transfer line was 100 km. A hydrogen refrigeration station was placed at intervals of every 10 km. The rated current and withstand voltage of the DC power lines were 10 kA and 100 kV respectively. To keep the liquid state of hydrogen present throughout the unit section, the temperature and pressure of the inlet points were set to 17 K and 0.4 MPa respectively. When the heat leak into the liquid hydrogen was 1.0 W/m (expected value), the temperature at the outlet was 18.1 K. The power consumption of the 20 kW-class refrigerator was estimated to be 1.32 MW. The total power consumption for the hybrid energy transfer line of 100 km in length was 13.2 MW. This value is equivalent to 1.3% of the transport capacity of 1 GW.

Keywords: Fusion power plant, electrolysis, hydrogen production, energy transportation, MgB₂ cable

1. はじめに

現在、化石燃料の高騰、CO₂ の削減等、エネルギーに対する経済的あるいは社会的課題が浮上しており、クリーンで且つ燃料資源が局在化しない代替エネルギーが切望されている。核融合エネルギー炉は、炉材料、核反応プラズマの挙動、経済性等の課題が解決できれば、最も有望なエネルギー炉の候補のひとつとなる。

核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置（LHD）の閉じ込め特性、大型超電導装置の建設の経験に基づいて、LHD 型核融合エネルギー炉（FFHR）のデザインスタディ

を国内外の大学、研究機関との共同で行っている^{1,2)}。筆者らは、核融合炉の出力形態の自由度を得るために、電気出力と水素燃料製造を併用するパワープラントについて検討を行っている³⁾。

電気出力と水素燃料製造併用のパワープラントは、①炉心熱出力の変動に対する出力の平準化、②昼夜の需要変動の調整、③将来の水素社会のニーズへの対応、等の観点から有効と考えられる。水素燃料は、ダイバータ部あるいは中性子遮蔽部から得られる廃熱を利用して高温水蒸気を発生し、この水蒸気を電気分解して製造する⁴⁾。ここで得られる水素ガスの圧力は大気と同程度であり、エネルギー密度は低い。エンドユーザへの輸送、貯蔵の高効率化を図るためには、水素ガスを圧縮または液化して、高エネルギー密度化を図る必要がある。

米国では、液体水素冷却高温超電導ケーブルによる電力と水素燃料同時輸送ライン Energy Super Grid が米国 EPRI によって提案されている⁵⁾。欧州でも、超電導パワーケーブルと燃料輸送パイプラインとの統合によるグローバルネットワークシステム World Energy Network System が議論されている⁶⁾。但し、これらの報告の水素燃料同時輸送ラインは、実用段階にはまだ至っていない。

Received July 16, 2008

^{*1} 核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6

Large Helical Device Project, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroschi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan

^{*2} 核融合科学研究所 炉工学研究センター

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6

Fusion Engineering Research Center, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroschi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan

^{*3} (株) K & T

〒114-0023 東京都北区滝野川 5-5-5 シンエイビル 6F

5-5-5 Takinogawa, Kita-ku, Tokyo, 114-0023, Japan

† E-mail: yamadas@LHD.nifs.ac.jp

Table 1 Main parameters of FFHR2m2

		FFHR2m2
Heating power	MW	100
α heating efficiency		0.9
Plasma beta	%	4.1
Plasma temperature	keV	16.1
Blanket space	m	1.1
Fusion output	MW	3,000
Electric output	MW	1,000

本報告では、先ず FFHR の電気出力の一部又は全てを電気分解に投入した時に得られる水素の量について調べる。次に、LHD で実用化した超電導バスラインの経験を基にして^{7,8)}、100 トン/日の液体水素輸送と 1 GW 級の電力を同時に輸送するライン (HETL: Hybrid Energy Transfer Line) の構造について検討を行う。更に、HETL の圧力損失、冷凍機の動力、等について検討を行う。

2. ヘリカル型核融合炉と水素製造

2.1 ヘリカル型核融合炉

ヘリカル型核融合炉は、1) プラズマ電流の駆動・維持が不要、2) 電流誘発型のプラズマディスラプションが無い、等の特徴を有する。安定で且つ定常運転の核融合炉にとって重要な要素である。ヘリカル型核融合炉 (FFHR) は、コンパクト高磁場の FFHR2m1 と LHD の磁場配位をスケールアップした FFHR2m2 の 2 つのタイプを優先して最適化を行っている。FFHR2m2 の熱出力及び電気出力はそれぞれ 3 GW と 1 GW になるように装置は最適化されている。FFHR2m2 の主要諸言を **Table 1** にまとめる。

2.2 水蒸気電気分解による水素製造

発電と水素製造併用の核融合炉を **Fig. 1** に模式的に示す。炉心からの中性子はブリーダブランケットでエネルギー変換されて、冷却ループに熱を伝える。また、ブリーダブランケットでは、リチウムと中性子の反応によって核

Fig. 1. Schematic illustration of the co-generation system of hydrogen and electricity.

Table 2 Relation between steam temperature and required heating power

Steam temperature	°C	150	200	250	300
Heating power	MW	198	206	213	221

融合燃料である三重水素を製造する。炉心からのヘリウム灰は、磁力線に沿ってダイバータ部へ流出して排気される。代表的な反応は、

で表される。FFHR では、ダイバータ部への熱移動は約 450 MW と計算される。本システムでは、この廃熱で水蒸気を作り、高温水蒸気電気分解により水素を製造する。

水蒸気を電気分解するのに必要なエネルギー ΔH は、電気分解前後のガスのエンタルピー差 ΔS と外部から入力する電気エネルギー ΔG との和である。

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (= \Delta G + \Delta Q) \quad (3)$$

ここで、 ΔH は水蒸気の温度の変化に対して、殆ど変化しない。換言すれば、水蒸気の温度を上げて熱エネルギーの入力を増加させれば、電気エネルギーを低減させることが可能である⁹⁾。電気分解に必要な最小電圧 (理論電解電圧) は、100°C 近傍の水で 1.48 V、水蒸気で 1.3 V となる。実際の電気分解装置では、電解質部あるいは電極部などで抵抗性電圧降下が発生するので、理論電解電圧より高い値で運転される。

今日、さまざまな方式の電解装置が検討されている。水 (液体) の場合には、アルカリ水の電解装置が広く用いられている。100 °C 近傍では PEM (Proton exchange membrane) 法あるいは SPE (Solid polymer electrolyte) 法があり、水素イオンが透過して酸素と分離する。一方、800°C 以上の高温では、固体電荷型高温水蒸気電解法が開発されつつあり、高効率化が期待できる。

今、1 GW の発電出力を全て高温水蒸気電気分解に適用すると、706 トン/日の水素が製造される。電解に必要な水蒸気は 6354 トン/日である。水蒸気とその製造に必要な熱量の関係は **Table 2** に示される通りである。ここで、水温の初期値は 20°C で計算しているが、熱源の大半は水の蒸発潜熱であり、20°C から 100°C の水の温度上昇及び 100°C の水蒸気を温度上昇させる時の顕熱はさほど大ではない。Table 2 から明らかなように、6354 トン/日の水蒸気の製造に必要な熱量は、ダイバータ部の廃熱が利用できることが分かった。

2.3 水素ガスのパッケージング

電気分解によって得られた水素ガスは大気圧状態であり、密度が低い。水素のハンドリングあるいは水素のエンドユーザへの輸送性を考慮すると、圧縮水素ガスもしくは液体水素に加工することによってエネルギー密度を高くする必要がある。

Fig. 2 Comparison of the power required for the compression of the hydrogen for isothermal and adiabatic conditions.

まず、水素ガス圧縮について調べる。液化の場合と同程度の高エネルギー密度にするため、ここでは圧縮比は 500 とする。このような大きな圧縮を実現するためには多段圧縮が必要となり、圧縮プロセスも、理想の等温圧縮よりは低効率の断熱圧縮に近くなる。ここでは、等温圧縮と断熱圧縮の平均値で圧縮機の動力を評価する。風量 100 トン/日を固定し、圧縮比を変化させた時の圧縮機の動力の解析結果を **Fig. 2** に示す。

一方、液化に必要な動力は、圧縮機の動力より更に大きな値となる。大型の水素液化冷凍機は建設例が殆ど無く、また設計方式によってプロセス効率も大きく変化する。ここでは、WE-NET¹⁰⁾で検討された 30 トン/日の水素液化機の動力 7.67 MW を外挿して評価した。即ち、水素液化機の動力は、液化量 100 トン/日で 26 MW とした。

Fig. 3 Electric power and hydrogen production vs. fraction of power to electrolysis.

Fig. 4 Power flow from fusion output to power generation and electrolysis.

2.4 核融合炉の出力形態

前節の検討結果をふまえ、電気分解へ供給する電力量を変化させて、水素の製造量を調べた。その結果を **Fig. 3** に示す。発電出力を全て電解に投入した場合、50 MPa の圧縮水素ガスが 637 トン/日、または 596 トン/日の液化水素が製造可能となる。

FFHRm2 の運転形態並びにパワーフローを **Fig. 4** にまとめる。図中の case (A) は既存のパワープラントと同じで、発電出力を全て送電する運転。これに対し、case (B) と case (C) は発電出力を全て水素燃料製造にまわす運転で、将来の水素社会に対するインフラストラクチャとして有望視される。また、case (D) は夜間電力を利用した水素製造を行う運転であり、需要側の変動を吸収するのに有効である。次の 3 章では、case (D) の電力と水素燃料の同時輸送システム HETL (Hybrid Energy Transfer Line) について検討を行う。

2.5 水素製造のシナジー効果

核融合発電による水素製造では、CO₂ を排出しないので、クリーンな燃料製造として切望される。核融合炉自身にとっても、燃料の自給の観点から、水素製造はシナジー効果を有する。即ち、(1) 式に示される炉心の融合反応において、燃料となる重水素²D は海水中に HDO 等として存在するが、三重水素は自然界に殆ど存在しない。従って、(2) 式に示されるように、⁶Li と中性子を反応させて三重水素³T を炉自身で製造する。ここでリチウムは鉱物として存在するが、核融合炉が既存の原子炉並みに稼動すると、リチウム鉱物は 100 年は持たないとも言われている。しかし、海水中に 150 ppb 程度含まれており、この資源が有効に抽出できれば、リチウムの問題は解決する。ここで提案する水蒸気電気分解では、海水を濃縮・蒸発させる工程で、

Table 3 Design parameters of the hybrid energy transfer line

Items	Target values
Target Distance	
total length to end user	100 km
unit length between cooling sta.	10 km
Power Transmission	
withstand voltage of each line	+50 kV and -50 kV
rated current	dc 10 kA
Hydrogen Transportation	
Transportation capacity of a line	50 ton/day (1.6 kg/s)
Pressure of liquid hydrogen	0.4 ~ 0.6 MPa

海水中に含まれる鉱物資源も同時に濃縮されるので、リチウム等の資源回収の高効率化が期待できる。今、電解に必要な水 6354 トン/日の中には、約 1 kg のリチウムが含まれる。一方、100 トンの水素中には約 14 kg の重水素を含んでいる。効率 35% で発電出力 1 GW の核融合炉では、1 日あたり約 0.5 kg の重水素が燃料として必要となる。水素燃料の製造は、燃料を自給する核融合炉にとって魅力的な出力形態のひとつと考えられる。

3. 液体水素と電力の同時輸送ライン

液体水素と電力の同時輸送ライン (HETL) は、1) 低損失長距離エネルギー輸送、2) 低電圧大電流直流送電、3) 電力と水素燃料の同時輸送システムである。HETL の工学的適用性を評価するために、総延長は 100 km とした。現地での敷設、あるいは輸送性を考慮し、フレキシブルな構造とする。超電導送電ケーブルの送電容量は 1 GW とする。即ち、定格電流は 10 kA、運転電圧は対地に対して + 50 kV と - 50 kV (線間は 100 kV) とする。HETL の冷却は 10 km 毎に設置する水素冷凍機で除熱する。一方、液体水素の定格輸送量は 100 トン/日とし、往路と復路のトランスファチューブでそれぞれ 50 トン/日ずつの流量を分担する。ここで、HETL の主要設計パラメータを **Table 3** にまとめる。

3.1 超電導ケーブル

超電導線材への要件として、1) 原料、製造コストの低廉化が期待できる線材、2) 限られた断面で、20 K ~ 24 K の運転ができる線材、3) 大電流化、加工性に優れた線材、等があげられる。線材の候補として、Bi2223 Tape、Bi2212 Rutherford cable、YBCO Tape、MgB₂/Cu 等が挙げられる。こうした高温超電導線材は、一般的に高価、機械的特性などの観点で課題がある。ここでは、低廉化の可能性を有する MgB₂/Cu を第一候補として選択し、HETL 用ケーブルの設計を行った。

HETL に用いる候補線材の一例として、菱沼らが物材機構との共同で開発した MgB₂ 超伝導線材の断面を **Fig. 5** に示す。この線材は、タンタル金属をバリア材として有する MgB₂/Cu 単芯線であり、線材長 100 m 級の長尺線材加工

Fig. 5 Cross-sectional view of a MgB₂ strand of 10 kA

性を実証しており、HETL 応用として興味深い線材である。更に、この線材の 4.2 K 低磁場領域中における臨界電流特性は実用 Nb-Ti 線材と比較して同等以上の特性であり、例えば 4.2 K、1 T の外部磁場で臨界電流が 200 A 以上であることが確認された¹¹⁾。また、20 K のような高温領域での臨界電流測定によって、同線材の臨界電流が 84 A (20 K @1 T)であることが確認され、20 K 応用への展望が期待される^{12,13)}。

Fig. 5 に示すこの線材を用いて、2つのタイプの 10 kA 級の超電導ケーブルを設計した。超電導ケーブルの緒言を **Table 4** に、ケーブルの構造を **Fig. 6** に示す。Type A は、液体水素中に浸漬して冷却する構造で、MgB₂/Cu 素線は 486 本の撚線 (3×3×3×3×6) とし、厚み 12 mm の電気絶縁を施している。Type B はパイプ上に配置した MgB₂/Cu 線を 2 層依積みにした構造で、パイプ状の素線配置の内側に液体水素を流して冷却する構造である。電気絶縁の厚みは Type A と同じ 12 mm とした。Type A も Type B も、自己磁場 *B* は、超電導ケーブルの外表面で最大となり、

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (4)$$

で表される。ここで、*R* はケーブルの外径、*I* は電流である。最大磁場は Type A で 0.12 T、Type B で 0.04 T となる。また、運転電流は、両者共に臨界電流に対して約 4 分の 1 程度に抑えている。

Table 4 Descriptions of Type A and Type B cables

Terms	Unit	Type A	Type B
Operation temperature	K	17 - 24	17 - 24
Diameter of SC cable	mm	36.8	103/105
Electrical insulation	mm	12	12
Area of liquid hydrogen	cm ²	103	79
Number of strands	-	486	500
Current of one strand	A	20.6	20.0
Magnetic field in SC cable	T	0.12	0.04
Cooling method	-	Bath cool	Hollow type
Type of SC strand	-	MgB ₂	MgB ₂

Fig. 6 Schematic drawing of 1 GW class cables: (a) twisted SC cable with 500 strands, and (b) hollow-type SC cable.

3.2 トランスファーチューブの圧力損失

Fig. 7 に示すように、HETL では 1 管 1 相方式を採用しており、トランスファーチューブ 2 本で往復の電流回路を形成する。但し、液体水素は 2 管共に同方向に流すので、1 管当りの流量は 50 トン/日 (0.58 kg/s) となる。Table 4 に示す断面寸法で、50 トン/日の流量を流したとき、10 km 先での圧力損失がどの程度になるかを調べた。ここで、管路は内径は 100 mm で (Type B)、内面は滑らかな直管で、液体水素の送り温度は 17 K と仮定する。管路摩擦係数 λ の評価に際しては、大きな流量に対して有効な Nikuradse の式、

$$\lambda = 0.032 + 0.021 \text{Re}^{-0.237} \quad (5)$$

を用いる。また、圧力損失 ΔP に対しては、Fanning の式、

$$\Delta P = 4\lambda \rho \frac{v^2 L}{2D} \quad (6)$$

を用いた。ここで、 Re はレイノルズ数、 ρ は冷媒の密度、 v は冷媒の流速であり、 L 及び D は管路の長さ及び直径である。ここで、液体水素の密度 (g/cm^3) は 0.0708 で、液体窒素は 0.808 である。(6) 式において、同一の流速であれば、液体水素の圧力損失は、液体窒素の圧力損失の 10 分の 1 以下となる。(5) 式及び (6) 式を用いて、HETL の圧

Fig. 7 Liquid hydrogen distribution in the HETL system.

力損失を調べた。液体水素の圧力を変化させたときの圧力損失の解析結果を **Fig. 8** に示す。

液体水素の圧力を上昇させれば、その沸点も上昇する。大気圧では沸点は約 20 K であるが、圧力を 0.4 MPa まで上昇させると、沸点は 25.5 K 近傍まで上昇する。高い圧力での送液は、1) MgB_2 ケーブルの運転温度領域を拡大することが可能で、2) HETL の敷設ルートの標高差によるヘッド損失に対しても吸収可能となる。また、**Fig. 8** より明らかに、液の状態を確保できれば、圧力損失は液体水素の温度変化に対して殆ど影響を受けず、一定値 (0.05 ~ 0.06 MPa 程度) を維持することが分かった。この結果をふまえ、液体水素の運転圧力は 0.4~0.6 MPa とした。

3.3 トランスファーチューブへの熱侵入

トランスファーチューブへの熱侵入の低減は、高効率 HETL を実現するために最も重要な課題のひとつである。LHD の超電導バスラインは、室温から 80 K 及び 80 K から 4 K へ 2 つの断熱真空層を有する 5 重同軸構造のトランスファーチューブを採用しており、これまでに 10 年以上安定に稼動している。厳しい敷設条件に耐えるため、管路間のスペーサを太く頑丈な構造にしたので、80 K への熱侵入は 2.84~2.92 W/m 程度になっている。

熱侵入の低減策としては、1) スペーサのスリム化 (伝導

Fig. 8 Pressure loss of 10 km-long HETL as a function of temperature of pressurized hydrogen.

Table 5 Calculation results of outlet temperatures for typical heat load cases

Temperature at inlet (K)	Temperature at outlet (K)			
	0.5 W/m	1.0 W/m	1.5 W/m	2.0 W/m
17.0	18.1	19.1	20.0	20.9
18.0	19.0	20.0	20.9	21.7
19.0	19.9	20.8	21.7	22.5
20.0	20.9	21.8	22.6	23.4
21.0	21.9	22.7	23.4	24.2

の低減)、2) 多層断熱材の枚数の増加（輻射の低減）、3) 1×10^{-3} Pa 以下の真空度の達成（対流の低減）、が有効である。高真空度を実現するためには、真空排気を行う前に乾燥した不純物のないガス（例えば乾燥した窒素ガス）で置換するのは効果的である。これらの熱侵入低減策により、単位長あたりの熱侵入を 1 W/m 程度に抑制できる見込みはある¹⁴⁾。

液体水素への熱負荷をパラメータとして、10 km での液体水素の温度の上昇について調べた。ここで、管路の断面積は 79 cm² (Type B と同じ) とし、1 管当りの流量は 50 トン/日とした。計算結果を Table 5 にまとめる。トランスファーチューブへの熱侵入が 1 W/m の場合、10 km 先での温度上昇は 2 度以下である。熱侵入が 2 W/m であったとしても、送液温度が 20 K 以下であれば、10 km 先での温度は 25 K 以下となり、安定な運転は可能である。

熱侵入が 1 W/m の場合、10 km 先に設置する水素冷凍機には、17 K で 20 kW の冷凍能力が要求される。Carnot 関数を用いて水素冷凍機の動力 P は、

$$P = W_L \frac{T_H - T_L}{T_L} \frac{1}{\eta} \quad (7)$$

で近似的に表される。ここで、冷凍機は $T_H (= 300 \text{ K})$ と $T_L (= 17 \text{ K})$ の間で運転される。 W_L は温度 T_L における冷凍パワーで、 η は Carnot サイクルの効率である。効率 η を 0.25 と仮定すれば、20 kW @17 K の水素冷凍機の動力は 1.32 MW となる。総輸送距離 100 km の HETL における水素冷凍機は 10 台であり、その総動力は 13.2 MW となる。この値は、送電容量 1 GW の 1.32 % に相当する小さな値である。HTEL システムの主要設計パラメータを Table 6 にまとめる。

4. 結論

核融合炉による発電と水素燃料の製造、及び電力と水素燃料の同時輸送について検討を行った。出力の平準化及び運転の自由度を得るために、1) 発電出力を全てエンドユーザへ送電、2) 全出力を高圧水素ガスの製造、3) 全出力を液化水素の製造、4) 出力の一部を液化水素の製造、の運転方法を検討した。1 GW の電力と 100 トン/日の水素燃料を同時輸送する HETL システムの概念設計を行い、その適合性・有用性を確認した：1) 液体水素の圧力を高

Table 6 Main parameters of the HETL of the unit section

Items	Target values
Length of HETL	10 km
Capacity of refrigerator	20 kW
Electrical power of the refrigerator	1.32 MW
L-H2 inventory in one-way 10 km tube	78.5 m ³

くすれば、沸点も高くなる。高い圧力での送液は、超伝導ケーブルの温度マージンの上昇、敷設ルートへのヘッド損失にも対応可能となる。2) 侵入熱が 1 W/m の場合、10 km 毎に設置する冷凍機の動力は、1.32 MW と見積もられる、3) 目標 100 km のエネルギー輸送では、その総動力は 13.2 MW (10 台の冷凍機) となる。この値は、既存の鉄塔送電路の損失と比べて、遜色は無い。

本研究は、核融合科学研究所研究課題 NIFS07ULAA103 並びに同研究助成によって遂行されました。また、トランスファーチューブの熱侵入の低減に対しては、Nexans Deutschland の Klaus Schippl 氏に有意義な議論と助言を頂きましたことを銘記し、深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) A. Sagara, S. Imagawa, O. Mitarai, et al.: "Improved structure and long-life blanket concepts for heliotron reactors", Nuclear Fusion **45** (2005) 258-263.
- 2) A. Sagara, O. Mitarai, S. Imagawa, T. Morisaki, et al.: "Conceptual design activities and key issues on LHD-type reactor FFHR", Fusion Eng. and Design **81** (2006) 2703-2712.
- 3) S. Yamada et al., "Conceptual design of the cryogenic system for the helical-type fusion power plant FFHR", Fusion Eng. and Design **82** (2007) 2817-2823.
- 4) K. Okano, et al.: "Efficient hydrogen production using het in neutron shield of fusion reactor", J. Plasma and Fusion Res., **77** (2001) 601-608. (in Japanese)
岡野邦彦ら：「核融合炉の遮蔽部を利用した高効率水素製造」, プラズマ核融合学会誌 **77** (2001) 601-608.
- 5) T. J. Overbye, et al.: National Energy Supergrid Workshop Report, Nov. 6-8, 2002, Palo Alto, California, USA.
- 6) P. M. Grant, et al.: WETS'03 Workshop Report, June 2003, Meudon, France.
- 7) S. Yamada, T. Mito, et al.: "Overall operating characteristics of superconducting current-feeder system for the LHD", Advances in Cryog. Eng. **45** (2000) 1525-1532.
- 8) S. Yamada, T. Mito, et al., "Stable long-term operation of superconducting current-feeder system for the LHD", IEEE Trans. on Applied Supercond. **12** (2002) 1128-1131.
- 9) J. Sheffield, W. Brown, G. Garrett, et al., "A study of options for the deployment of large fusion power plants", JIEE-2000-06, June 2000, Joint Institute for Energy and Environment, Knoxville, USA, pp. 1-45.
- 10) WE-NWT Report 2001; <http://www.enea.or.jp/WE-NWT/>
- 11) Y. Hishinuma, A. Kikuchi and T. Takeuchi: "Superconducting

properties and microstructure of MgB_2 wires synthesized with a low-temperature diffusion process”, *Superconductor Science and Technol.* **20** (2007) 1178-1183.

- 12) Y. Hishinuma, S. Yamada, A. Kikuchi and T. Takeuchi: “Superconducting property in high temperature of the MgB_2 superconducting wire synthesized with low temperature diffusion process”, *Abstract of CSJ Conference*, **77** (2007) 104.

菱沼良光, 山田修一, 菊池章弘, 竹内孝夫: 「低温拡散により製作した MgB_2 超伝導線材の高温における超伝導特性」, 第 68 回 2007 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集(2007) 104.

- 13) H. Hishinuma, A. Kikuchi, T. Takeuchi and S. Yamada: “Critical transport current properties in the high-temperature region of Cu added MgB_2 wire using a Mg_2Cu compound as the additional source material”, *TEION KOGAKU* **43** (2008) 360-364. (in Japanese)

菱沼良光, 菊池章弘, 竹内孝夫, 山田修一: 「 Mg_2Cu 化合物を添加源とした Cu 添加 MgB_2 超伝導線材の高温領域における臨界電流特性」, *低温工学* **43** (2008) 330-335.

- 14) K. Schippl, “Very low loss cryogenic envelope for long HTS Cables”, *Proc. of 6th EUCAS, Sorrento, Italy*, 14-18 Sept. (2003) 360-364.

山田修一 1950 年生。1975 年名古屋工業大学電気工学科卒業。1972 年名古屋大学プラズマ研究所勤務。1989 年文部科学省核融合科学研究所勤務、低温技術係長、助手、助教授、准教授。現在に至る。逆転磁界ピンチプラズマ、系統電力安定化、大型ヘリウム液化冷凍機、超伝導送電システム、等の研究開発に従事。プラズマ核融合学会、電気学会、低温工学協会会員。工学博士。

菱沼良光 1971 年生。1994 年東海大学工学部金属材料工学科卒業。1996 年同大学院工学研究科博士前期課程(金属材料工学専攻)修了。1999 年筑波大学大学院工学研究科博士課程(物質工学専攻)修了。2001 年文部省核融合科学研究所大型ヘリカル研究部装置技術研究系 助手。現在、大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所 炉工学研究センター助手。主に先進核融合装置への超伝導線材の開発に従事。低温工学協会、日本金属学会、プラズマ・核融合学会会員。博士(工学)。

上出俊夫 1948 年生。1969 年幾徳工業高等専門学校電気工学科卒業。同年富士電機(製造)株式会社入社。主として原子力関係制御装置の開発並びに超伝導機器開発に従事。2003 年九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程修了。2004 年 4 月-2006 年 4 月 JICA シニア海外ボランティアとしてジャマイカ国 Caribbean Maritime Institute に派遣、現在、(株)K&T 顧問、清和印刷(株)代表取締役、2008 年 3 月より JICA シニア海外ボランティアとしてボツワナ国 Gaborone Technical College に派遣中。電気学会、低温工学協会会員。博士(工学)。

相良明男 1951 年生。1974 年名古屋大学工学部原子核工学科卒業。1979 年同大学院工学研究科博士課程満了。1986 年名古屋大学プラズマ研究所助手。1989 年核融合科学研究所助手。1992 年核融合科学研究所助教授。2004 年核融合科学研究所教授。2008 年核融合科学研究所炉工学研究センター・センター長、現在に至る。この間に北海道大学客員教授、名古屋大学客員教授、総合研究大学院大学教授併任。核融合工学・特にプラズマ壁相互作用における物質移行物理工学とイオンビーム表面解析、中性子工学、炉システム設計統合、などの研究に従事。日本原子力学会、日本物理学会、プラズマ・核融合学会、米国原子力学会会員。工学博士。