Nb₃Al 導体の電磁力下での圧力損失特性 — 圧力損失特性と撚線剛性の関係 —

濱田 一弥[†], 松井 邦浩, 高橋 良和*, 中嶋 秀夫, 加藤 崇,
CS モデル・コイル実験グループ[@]

日本原子力研究所 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1 ([†]E-mail:hamada@naka.jaeri.go.jp)

* ITER 国際チーム 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

(2003 年 7 月 17 日受理)

Pressure Drop Characteristics of Nb₃Al Cable-in-Conduit Conductor under Electromagnetic Force

— Relation between Pressure Drop Characteristics and Cable Stiffness —

Kazuya HAMADA, Kunihiro MATSUI, Yoshikazu TAKAHASHI*, Hideo NAKAJIMA,
Takashi KATO and CS MODEL COIL TEST GROUP[@]

Japan Atomic Energy Research Institute, 801-1, Mukoyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-0193

* ITER International Team, 801-1, Mukoyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-0193

(Received July 17, 2003)

Synopsis: The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has demonstrated the superconducting performance of a large coil using a newly developed cable-in-conduit Nb₃Al conductor comprised of 1,152 superconducting strands bundled on a central cooling channel. The conductor was developed as one of the R&D activities of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). The hydraulic performance of the Nb₃Al conductor under electromagnetic force was studied to clarify the relation between pressure drop under electromagnetic force and cable stiffness. Under an electromagnetic force of 500 kN/m, the pressure drop of the Nb₃Al conductor decreased by 5%, which is smaller than the 13% decrease measured for a Nb₃Sn conductor. This characteristic was well simulated by taking into account the high stiffness of the Nb₃Al cable as related to the high strength and stiffness of Nb₃Al strand. Furthermore, the pressure drop of several Nb₃Sn conductors tested in previous R&D studies was investigated by means of the same evaluation method to study the effect of cable types. It was concluded that the pressure drop under electromagnetic force can be explained by taking the cable stiffness of any type of CIC conductor into account. This paper describes the measurement results, detailed evaluation method, and considerations that led to this conclusion.

Keywords: ITER, cable-in-conduit, pressure drop, electromagnetic force, Nb₃Al Insert

1. はじめに

日本原子力研究所(原研)は, 国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)の工学設計活動で進められた中心ソレノイド(CS)モデル・コイル計画の一環として, 先進的な超伝導線材で

ある Nb₃Al 超伝導素線を用いた Nb₃Al インサート・コイルを開発し, ITER で要求される特性(13 T-46 kA)の実証に成功した¹⁾。これまで筆者らは, CS モデル・コイル計画^{2,3)}の中で試験した中心チャンネル付きケーブル・イン・コンジット導体の圧力損失の測定を詳細に行うことにより, 電磁力により導体の圧力損失が減少すること^{4,5)}及び通電後も撚線の変形が残存することにより, 圧力損失が減少した状態となることを明らかにした⁶⁾。

[@] 本特集号:小泉徳潔ら「核融合炉応用を目指した Nb₃Al 導体の開発と大型超電導コイルへの適用」
低温工学 38 (2003)391 参照

Table 1 Hydraulic parameter of conductors

	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F
	CS Insert ⁸⁾ / Nb ₃ Al Insert	11A/15A ⁹⁾	5A/7A ⁹⁾	TF Model Coil (two conductors) ^{10,11)} / 17A ⁹⁾	1A ⁹⁾	TF Insert ¹²⁾
Conductor length, m	141/93	154/177	117/128	72,82/188	84	43
No. of strands	1,152	1,080	1,080	1,080	1,152	1,152
Local void fraction, %	36.3	36.9	36.7	35.5	34.7	35.9
Center channel, mm (ID/OD)	10/12	10/12	9/12	10/12	10/12	10/12
Global helium flow cross section, mm ² / hydraulic diameter, mm	440/0.62	411/0.58	411/0.59	411/0.58	427/0.56	444/0.59

この電磁力下の圧力損失の変化は、燃線の剛性と密接に関係していると思われるが、その関係については明らかとされていない。本論文では、燃線の変形度合の指標として燃線剛性という表現を使用する。また、剛性が低いとは変形しやすいこと、剛性が高いとは変形しにくいことを示す。

一方、Nb₃Al超伝導材料は、Nb₃Sn超伝導材料と比較して、ヤング率、強度が高いことから⁷⁾、Nb₃Alインサート・コイル導体の燃線は電磁力に対して高い剛性を持つことが期待され、電磁力下での圧力損失の減少も小さいことが予想される。このため、Nb₃Alインサート・コイル導体の電磁力下での圧力損失特性を検討することは、圧力損失特性と燃線剛性の関係を把握する上で、非常に重要となる。

そこで、本論文では、Nb₃Al インサート・コイル導体の電磁力に対する圧力損失の変化を測定し、Nb₃Al インサート・コイル導体と同じ燃線構造を持つ CS インサート・コイル導体と比較することで、燃線剛性と電磁力下での圧力損失特性との関係を検討した。さらに、これまで測定された中心チャンネル付き Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体 10 本の圧力損失の測定結果を解析・検討することで、燃線剛性と電磁力下での圧力損失特性との関係の一般化を試みた。

2. 評価導体の水力パラメータ

Nb₃Al インサート・コイルの導体¹⁾は、直径 0.81 mm の超伝導素線を、1,152 本燃り合わせ、肉厚 2 mm のステンレス鋼の薄肉円形コンジットに挿入した、ケーブル・イン・コンジット導体である。本導体の燃線部の外径や燃線構造、中心チャンネルの形状などは比較対象とした CS インサート・コイルと同様であり、コン

ジット材料及び形状が異なるだけである。従って、電磁力の作用しない状態の圧力損失特性を考える場合は、全く同じ導体として取り扱うことができる。Nb₃Al 及び CS インサート・コイル導体の水力パラメータを Table 1 に示す。上記導体と共に、10 本の Nb₃Sn 導体の圧力損失に対する電磁力の影響を 6 章において検討しているので、これらの導体についても水力パラメータを Table 1 に示す。

3. 電磁力下の圧力損失の評価方法

大型コイルの通電実験においては、温度、圧力、流量条件が時間と共に微妙に変化するため、この変化を考慮して、電磁力下の圧力損失を評価する必要がある。中心チャンネル付き導体の圧力損失は、中心チャンネルと燃線部の並行流路として計算するが、電磁力による影響の度合いを評価する場合は、導体を一つの流路と見なして、取り扱う方が便利である⁶⁾。このような観点から、筆者らは、以下に示す電磁力下の圧力損失評価方法を考案している⁵⁾。なお、詳細な手法については、参考文献を参照されたい。

- ①電磁力が作用しない状態において、圧力損失と流量を 4.5 K で測定する。
- ②次に、測定した流量、圧力損失を用いて、(1)、(2)、(3) 式の関係から、管摩擦係数とレイノルズ数の関係(4) 式の係数 C₁、C₂ を求める。

$$\Delta P = 4f \frac{\rho(P, T)v^2}{2} \frac{L}{d_H} \quad (1)$$

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho(P, T)S} \quad (2)$$

$$Re = vd_H \frac{\rho(P, T)}{\mu(P, T)} \quad (3)$$

ここで、 ΔP : 圧力損失, f : 管摩擦係数, ρ : 密度(圧力 P と温度 T から計算), L : 導体長さ, d_H : 水力直径, v : 流速, $\dot{m}$: 流量, S : 流路断面積, Re : レイノルズ数, μ : 粘性係数(圧力 P と温度 T から計算).

$$f = C_1 Re^{C_2} \quad (4)$$

③(1)~(4)式を用いて、通電中の各時間における圧力、温度及び流量から、電磁力が作用しない状態での圧力損失を推定する。

④通電中の測定された圧力損失と③で計算した圧力損失の差が電磁力によるものと考えられる。

4. Nb₃Al インサート・コイル導体の圧力損失測定結果

4.5 K における Nb₃Al インサート・コイル導体の、電磁力の作用しない状態での圧力損失の測定結果を Fig. 1 に示す。また、比較のため、同図には、燃線構造の同じ CS インサート・コイルの測定結果も示す。この図から明らかなように、両者は極めて良い一致を示しており、電磁力が作用しない状態での圧力損失は、燃線構造で一義的に決定されることが示唆される。

Nb₃Al インサート・コイル導体の電磁力の作用しない状態でのレイノルズ数と管摩擦係数の関係を Fig. 2 に示す。実線で示したのは、最小二乗法による近似関数であり、次式で与えられる。

$$f = 2.620 \times 10^{-2} Re^{-0.1345} \quad (5)$$

Fig. 3 は CS モデル・コイルを通電し、その後 Nb₃Al インサート・コイルの通電を行ったときの Nb₃Al インサート・コイルの圧力損失の測定結果である。また、Fig. 3 の縦軸は、通電中に測定された圧力損失(ΔP_{MEAS})を、(1)~(3), (5)式で計算した電磁力の作用していない状態での圧力損失(ΔP_{CAL})で規格化(= $\Delta P_{MEAS}/\Delta P_{CAL}$)した値で示してある。通電開始時点での Nb₃Al インサート・コイルの入口の温度及び圧力は、4.5 K, 0.6 MPa である。Fig. 3 の 0~4,000 秒の区間において、圧力損失が一度上昇し、元に戻る現象は電磁力による影響ではなく、CS モデル・コイルの励磁により Nb₃Al インサート・コイルに誘起される渦電流損失の影響である。すなわち、CS モデル・コイルの励磁中は、渦電流損失により、Nb₃Al インサート・コイルに流れる超臨界ヘリウムの温度が上昇し、圧力損失は変動する。CS モデル・コイルの電流が一定になると渦電流による発熱が

Fig. 1 Measured pressure drop in Nb₃Al Insert at 4.5 K. Vertical axis is the pressure gradient along the conductor. As a reference, the measured pressure drop in CS Insert is also shown.

Fig. 2 Friction factor as a function of the Reynolds number at 4.5 K. Global friction factor and global Reynolds number are calculated from the hydraulic diameter, which is estimated from the global hydraulic perimeter and helium flow cross section.

無くなるので、暖かいヘリウムが Nb₃Al インサート・コイルから抜け出ると、圧力損失は CS モデル・コイルの通電前の値に戻ると考えられる。従って、Fig. 3 の 4,000 秒付近では、ヘリウムの流れはまだ過渡的な状態であり、グラフの傾向から数 100 秒以内には 1 に落ち着くと思われる。Nb₃Al インサート・コイルの通電を開始 (Fig. 3 の 4,000 秒以降) すると、電流値が 10 kA までは、通電電流の増加に伴い、圧力損失は増加し、その後徐々に減少し始め、46 kA の定格通電時の圧力損失は、電磁力が作用していない状態よりも 5% 低下する。また、電流を下げると圧力損失は増加し、通電終了後に初期の値に戻っている。この様に、CS インサート・コイルと同様、Nb₃Al インサート・コイル導体

についても、電磁力によってヘリウムの流路である燃線部が変形することによる圧力損失の変化が確認されたが、その変化の様子は、CS インサート・コイルと異なった傾向を示している。また、CS インサート・コイル (約 13%)⁴⁾ の低下に比べ、圧力損失の低下は、その約 1/3 となっている。この原因として、Nb₃Sn 素線と Nb₃Al 素線の燃線剛性の違いが考えられるため、以下に考察する。

5. 電磁力下での圧力損失変化に関する考察

5.1 圧力損失変化の電磁力による整理

Fig. 3 で見られた圧力損失の変化は、導体に作用する電磁力と密接な関係があるため、通電中の圧力損失変化を電磁力で整理する必要がある。さらに、Nb₃Al インサート・コイル導体と CS インサート・コイル導体は長さや通電中の磁場の分布が異なっているため、両者で測定された圧力損失の変化を直接比較するためには、電磁力の導体長手方向の分布を考慮したパラメータが必要となる。そこで、導体に加わる電磁力の代表パラメータとして、導体長手方向の電磁力を以下に示す方法で平均化した値 (平均電磁力) を考え、圧力損失を整理することとした。

導体長手方向の各点における電磁力は、通電電流値とその点における電流に垂直な方向の磁場成分の絶対値の積とし計算される。そこで、平均電磁力 (EMF_{AV}) は、この各点での電磁力を長手方向に積分し、導体長さで除することで、次式により定義した。

$$EMF_{AV} = \frac{I}{L} \int_0^L |B(x)| dx \quad (6)$$

ここで、 I は通電電流 (kA)、 L は導体長さ (m)、 $|B(x)|$ は導体の長手方向の位置 x における電流に垂直な磁場成分の絶対値 (T) である。

Nb₃Al インサート・コイル導体と CS インサート・コイル導体の圧力損失を (6) 式で計算した平均電磁力で整理した結果を Fig. 4 に示す。エラー・バーは測定中のノイズによる読み取り誤差を示している。Nb₃Al インサート・コイル導体の圧力損失の変化特性は、CS インサート・コイル導体の変化と比較すると、小さいことがわかる。さらに特徴的なことは、250 kN/m 以下の領域では圧力損失が増加する傾向が見られることである。対照的に、CS インサート・コイル導体では、250 kN/m 以下の電磁力の低い領域で圧力損失が大きく減少している。

Fig. 3 Pressure drop in Nb₃Al Insert at 13 T, 46 kA. The mass flow rate was approximately 10 g/s. The horizontal axis is time and vertical axis is normalized pressure drop ($\Delta P_{MEAS}/\Delta P_{CAL}$). ΔP_{MEAS} : measured pressure drop, ΔP_{CAL} : calculated pressure drop from mass flow rate, inlet and outlet pressure and temperature, using measurement results at 4.5 K.

Fig. 4 Normalized pressure drop as a function of electromagnetic force for a CS Insert (Nb₃Sn) and Nb₃Al Insert. The average value of electromagnetic force along the conductor length is used. Solid lines (1)~(3) are calculated values using the gap as a function of electromagnetic force as shown in Fig. 5.

すでに筆者らが示しているように、電磁力と圧力損失の関係は、燃線部、センター・チャンネル部及び燃線の変形による三日月形状の隙間の3並行流路を考慮した詳細解析により説明できる⁴⁾。また、特異な現象に見える電磁力による圧力損失の増加現象についても、この詳細解析により、起こり得ることを示している。すなわち、電磁力による隙間が小さい場合には、燃線部は、流路断面積が減少して流量が低下し、代わりに、隙間よりも主に中心チャンネルに分流し、逆に導体全

Fig. 5 Estimated gap as a function of electromagnetic force based on Eq. (7), calculated from pressure drop measurement. The line number corresponds to that of the line number indicated in Fig. 4. Using each curve, curves in Fig. 4 were produced. In the case of the Nb₃Al Insert (2), (2) is not suitable to represent the pressure drop measurement results (See Fig. 4). Nb₃Al Insert (3) indicates good agreement in Fig. 4.

体の圧力損失を増加させることになる。

従って、Nb₃Al インサート・コイル導体では、燃線が高い剛性を持つため電磁力による変形が小さく、電磁力が小さい領域で圧力損失が増加していると考えられる。そこで、圧力損失の測定結果から、3 並行流路モデルにより、Nb₃Al インサート・コイルの燃線剛性を推定することとした。

5.2 燃線剛性の推定方法

圧力損失の測定結果から、電磁力の増加に伴い変化する燃線剛性（電磁力と隙間との関係）を評価する手法は、既に報告しているので、隙間部の圧力損失の計算の概略のみ説明する⁴⁾。

電磁力によって燃線が変形したとき、燃線とコンジット間に生ずる隙間は、次式で表されると仮定する。また、燃線剛性はこの曲線の各点における傾き（微分値）の逆数で定義され、電磁力と共に変化する。

$$\gamma_{\text{Gap}} = C \times \left[0.5197 \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{F_{EM}}{37.42}\right) \right\} + 0.3014 \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{F_{EM}}{271.61}\right) \right\} \right] \quad (7)$$

ここで、C は係数であり、 γ_{Gap} は変形量(mm)、 F_{EM} (kN/m) は電磁力であり、電流値 (I) $\times$ 磁場 (B) として計算した。

導体外径を a とし、燃線部が楕円的に変形すると仮定した時の電磁力により発生する三日月形状の流路の

断面積 S_{EM} は、次式で表される。

$$S_{EM} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot \{a^2 - a \cdot (a - 2 \cdot \gamma_{\text{Gap}})\} \right] \quad (8)$$

また、三日月形状の流路の管摩擦係数は、なめらかな円管を仮定した。燃線部の管摩擦係数は、CS インサートと同じ特性なので、次式を使用した。

$$f_{\text{bundle}} = \frac{1}{4 \cdot \lambda^{0.72}} \cdot \left(\frac{19.5}{Re^{0.88}} + 0.051 \right) \cdot 1.35 \quad (9)$$

ここで、 λ はボイド率であり、電磁力により発生する断面積 S_{EM} を考慮すると、以下の式で表される。

$$\lambda(B) = \frac{S_{B_INITIAL} - S_{EM}(B)}{S_{CABLE} - S_{CC} - S_{EM}(B)} \quad (10)$$

ここで、 $S_{B_INITIAL}$: 変形前の燃線部のヘリウム流路断面積、 S_{CABLE} : ケーブル断面積、 S_{CC} : 中心チャンネルの断面積、である。

5.3 Nb₃Al 及び CS インサート・コイルの燃線剛性

Nb₃Al インサート・コイル及び CS インサート・コイル導体の燃線剛性を求めることは、(7)~(10)式を用い、規格化圧力損失の測定値が計算値と一致するように、(7)式の係数 C を求めることに帰着する。C の計算は、試験時の平均電磁力が最大となる条件で行い、Nb₃Al インサート・コイルが 550 kN/m、CS インサート・コイルが 442 kN/m であった。このようにして求めた、燃線剛性を Fig. 5 に示す。また、Fig. 5 の関係を用いて計算される規格化圧力損失と電磁力の関係を Fig. 4 に実線(1), (2)として示す。

Fig. 4 から明らかなように、CS インサート・コイル導体では、計算結果と測定値は良い一致を示すが、Nb₃Al インサート・コイル導体では一致せず、(7)式の様な指数関数的な特性では、測定された圧力損失の変化を表すことはできない。これは、Fig. 5 の曲線で示されているような 100 kN/m 以下で見られる非常に低い燃線剛性の領域が Nb₃Al 導体では生じないためであると考えられる。そこで、Nb₃Al インサート・コイル導体の燃線剛性は直線的な特性（燃線剛性は電磁力に依存せず一定）と仮定して、規格化圧力損失と電磁力の関係を求め、Fig. 5 の破線(3)として示した。その結果、Fig. 4 に示すように、Nb₃Al インサート・コイル導体の電磁力に対する圧力損失の変化をうまくシミュレーションすることができた。

以上のことから、燃線剛性が電磁力により変化していく原因は、燃線剛性が以下の三つの領域からなり、

順次変化するためと推定される。

- 領域 1: 素線自体が剛的に動き、撚線は非常に低い剛性を示す領域 (剛性: 100 N/mm^2 以下)
- 領域 2: 素線の曲げ、ねじり、滑り等の変形が支配的となる中間的剛性を示す領域 (剛性: $100 \text{ N/mm}^2 \sim$ 素線構成材料から複合則で計算される剛性)
- 領域 3: 撚線が完全に一体化し、素線を構成する素材の圧縮変形が支配的となる領域。 (剛性: 素線構成材料から複合則で計算される剛性)

測定された剛性の値から判断すると、(7)式で表される CS インサート・コイル導体の剛性は、領域 1~3 で構成されると考えられる。Nb₃Al インサート・コイル導体は、撚線の剛性が高いため、領域 1 は少なく、領域 2 が支配的となり、測定した電磁力の範囲では、領域 3 への遷移が現れない領域にあると思われる。このような場合、撚線剛性は、直線的特性となり、電磁力に対する圧力損失は一度増加し、減少に転じる傾向を示す。

5.4 撚線剛性と素線剛性の関係

以上のようにNb₃Al導体の撚線剛性が高いことが示されたが、この理由について、素線引張特性との関連でさらに考察を進める。Fig. 6は、ドイツのカールスルーエ研究所 (FZK) のNyilasにより測定された、熱処理前のNb₃Al素線の室温試験、Nb₃Al素線の室温及び7 K試験及びNb₃Sn素線の7 K試験で得られた4本の応力-歪み線図を示している¹³⁾。この結果より、Nb₃Al素線は室温においても7 Kにおいても、また、熱処理前の室温においても、応力-歪み特性はほとんど変わらないことが分かる。このことより、Nb₃Alインサート・コイル導体の撚線剛性は、超伝導生成熱処理を受けてもほとんど変化しないことが推定され、撚線製作時の撚線剛性がNb₃Alインサート・コイルの運転時まで維持されていると考えられる。

一方、Nb₃Sn素線の場合、7 Kにおける弾性域での応力-ひずみ特性は、Nb₃Al素線とほぼ同じであるが、塑性域における見かけの加工硬化率 (応力の増加率) は、Nb₃Al素線の1/2.5程度となる。Nb₃Sn及びNb₃Al素線は、銅と超伝導材料との複合材であり、銅の加工硬化は超伝導材料に対して少ないことが予想されるので、両素線の加工硬化率の比は、ほぼ、Nb₃AlとNb₃Snの超伝導材料のヤング率の比に等しいと考えられる。

Fig. 6 Stress strain curve of Nb₃Al and Nb₃Sn strands measured by A. Nyilas (FZK, Database).

このように、Nb₃Al素線とNb₃Sn素線の引張特性は、Nb₃AlとNb₃Snの超伝導材料の剛性の違いにより、大きく異なるが、弾性域での素線剛性は、ほとんど同じとなる。Nb₃Alインサート・コイルにおいてもCSインサート・コイルにおいても、電磁力が作用する前後で圧力損失特性に変化が見られていないので、撚線剛性は可逆的であると考えられる。すなわち、撚線剛性は、弾性域での挙動を基本に考えるべきであり、撚線剛性の違いを超伝導材料の剛性の違いだけで説明することはできない。

一方、Fig. 6に示す様に、室温の熱処理前の状態では、塑性領域(歪み0.1%以上の領域)でNb₃Al素線は高い加工硬化率を示す。Nb₃Sn素線に関しては、7 Kのデータしかないので明らかなことは言えないが、熱処理材の場合、一般的には低温と室温の加工硬化率は同程度である。このため、Nb₃Sn素線の加工硬化率はNb₃Al素線より低く、熱処理前であれば、室温における加工硬化率は低下し、銅の特性に近づくと考えられる。さらに、室温での撚線製作時は相当量の塑性変形が生じていることが推定され、Nb₃Alインサート・コイル導体とCSインサート・コイル導体の撚線剛性の違いは、この室温物性に関係していると思われる。すなわち、Nb₃Sn素線と比較して、Nb₃Al素線は撚線作業において降伏しにくく、撚線には素線の曲げによる応力が残留していると考えられ、素線の剛体的動きができないような撚線状況になっていると推定される。

ここで、撚線時に素線にどの程度の歪みがかかるかを概略計算してみる。歪みはFig. 7に示す様な単純な素線の曲げを考える。この様な曲げが5段階の撚線作

Fig. 7 Schematic drawing of twisted strands. For example, 1st twist stage, $2L_1=65$ mm, $2a_1=0.945$ mm, $d_0=0.81$ mm for the Nb_3Al Insert.

業によって加わるものとする。この素線の歪みは、以下の式で計算できる。

$$\delta = \sum_{i=1}^5 \frac{0.5d_{i-1}a_i}{L_i^2 + a_i^2} \quad (11)$$

ここで、 $2L$ が撚りピッチを、 d_{i-1} が $i-1$ 次撚線の直径を、 a_i が撚り直径を示している。計算の結果、 Nb_3Al 及び CS インサート・コイル導体の撚線構造では、約 0.4% の歪みがかかっていることになる。

Fig. 7 において、室温の Nb_3Al 素線に 0.4% の塑性歪みが撚線で生じていると仮定すると、 Nb_3Al インサート・コイル導体では 280 MPa 以上の応力が残留しており、CS インサート・コイル導体では、150 MPa 程度の応力が残留していることになる。また、 Nb_3Al インサート・コイル素線の場合、熱処理前後の引張特性が変化しないことから、この残留応力の超伝導熱処理による緩和は発生しにくく、コイルの動作温度である 4.5 K までこの応力は残留し、電磁力による変形に抵抗する力となる。一方、CS インサート・コイル導体においては、残留応力が低いこと、また超伝導熱処理による応力緩和が起こることが予想され、撚線にはほとんど応力が残留しない状態でコイルが運転されるため、素線の剛体的動きが生じる領域が現れると思われる。

以上のような理由で Nb_3Al インサート・コイル導体は、撚線剛性は高く、電磁力に対して撚線の変形が少なかったと考えられる。

6. Nb_3Sn 導体における撚線剛性の一般化

5 章では撚線構成が全く同じであれば、電磁力下での圧力損失の変化は、撚線剛性に依存することを明らかにした。ここでは、撚線構成が違う場合に、電磁力に対する圧力損失の変化が撚線剛性と関係するかを、

Fig. 8 Normalized pressure drop as a function of electromagnetic forces for the CS Model Coil and TF Model Coil. The average value of electromagnetic force along the conductor length is used. In the figure, solid lines are calculated values using Eq. (7) for the TF Insert and 1A.

これまでに実験された各種 Nb_3Sn 導体 (Table 1 の Type B-F 参照) の測定結果を基に考察する。前述の手法をこれらの導体に適用して整理したものが、Fig. 8 である。この図に示すように、 Nb_3Sn 導体では、(7)式で表される指数関数的な撚線剛性に基づくことによって、例えば、1A 導体および TF インサート・コイルでは図中の実線で計算結果が示されている通り、電磁力に対する圧力損失の変化は説明することができる。

さらに、原研が国際超伝導産業技術センター (ISTEC) と共同で試験を行った超伝導電力貯蔵 (SMES) モデル・コイル^{14,15)}の導体でも、このような電磁力による圧力損失の変化が確認されている。SMES モデル・コイルは、 NbTi の角型ケーブル・イン・コンジット導体 (素線径 $\phi 0.62$ mm x 972 本) を用いた、ダブル・パンケーキ・コイルであり、定格電流 20 kA で最大経験磁場は 2.84 T である。SMES モデル・コイルの通電時における圧力損失の低下は約 5% であり、この時の導体長手方向の電磁力の平均値は、94.8 kN/m (30 kA 通電) である。この点は Fig. 8 に示してあるが、TF インサート・コイル導体、5A 及び 7A と同じ特性を示していることがわかる。このことから、電磁力による圧力損失変化は、撚線剛性を考慮することにより、一般的現象として取り扱えることが分かる。

また、1A や 17A 及び TF モデル・コイル導体は電磁力が印可されても圧力損失の変動は少ない。これは、撚線構成により撚線剛性が異なるためであり、同じ超

伝導材料の場合、ボイド率に関係すると考えられる。この点を明らかにするため、平均電磁力 400 kN/m における各導体の規格化圧力損失の変化を Fig. 4 と 8 から補間してボイド率で整理したものを Fig. 9 に示す。ここで、比較する電磁力として 400 kN/m を選んだ理由は、以下の通りである。

- ・ 400 kN/m は、定格通電時の約 72% であり、Nb₃Sn 導体では、これ以上の電磁力の場合、電磁力の変化に対して圧力損失の変化が小さい。
- ・ 測定した導体はすべてコイル形状であり、通電試験の制限上、400 kN/m 以上の平均電磁力が加わる導体が少なく、比較の対象とする導体を多くする。

また、比較のため、Nb₃Al インサート・コイル導体についてもプロットした。Fig. 9 から明らかなように、燃線構成の異なる Nb₃Sn 導体においては、規格化圧力損失とボイド率には相関が見られ、ボイド率を極力下げることによって圧力損失の変化、すなわち、燃線の動きを少なくできる。例えば、Nb₃Sn 導体においても、ボイド率を 35% 以下まで小さくすることにより、燃線の動きが抑えられる。これは、ボイド率が小さくなると、素線の剛体的動きが抑制され、燃線剛性が大きくなることで説明できる。

7. まとめ

Nb₃Al インサート・コイル導体を含め、CS モデル・コイル計画で開発した中心チャンネル付きケーブル・イン・コンジット導体の燃線剛性の電磁力下での圧力損失特性に及ぼす影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- ①電磁力下での圧力損失変化は、電磁力の変化に伴う燃線剛性（導体断面の変形に対する抵抗）の変化を考慮することにより、超伝導素線の種類、燃り構成によらず、一般的に説明できる。
- ②Nb₃Al 導体は、燃線構成が同じ Nb₃Sn 導体に比べ、電磁力による圧力損失の変化は少ない。これは、Nb₃Al 素線の剛性が高いために、燃線作業によって発生する残留応力が燃線剛性を高めているからである。
- ③燃線構成の異なる Nb₃Sn 導体では、燃線剛性はボイド率と関係し、電磁力による圧力損失の変化は、ボイド率が小さくなると減少する。これは、ボイド率が小さくなると、素線の剛体的動きが抑制されて燃線剛性が大きくなるためである。

Fig. 9 Pressure drop as a function of void fraction at an electromagnetic force of 400 kN/m. The vertical axis is normalized pressure drop, which is defined as a measured pressure drop divided by a pressure drop at zero current. The solid line is a quadratic polynomial line calculated using plotted data except for Nb₃Al.

本研究を遂行するにあたり、日本原子力研究所 松田慎三郎理事、核融合工学部 関昌弘部長、関省吾研究主幹、高津英幸次長、辻博史次長を始め、多くの皆様からご支援、ご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また、TF モデル・コイルの圧力損失の測定データは、ドイツ・カールスルーエ研究所の A. Zahn 氏に御提供頂きましたことに謝辞を表します。

参考文献

- 1) 小泉徳潔ら：低温工学 38(2003)391
- 2) H. Tsuji, et al.: Fusion Eng. and Design 55 (2001) 153
- 3) T. Kato, et al.: Fusion Eng. and Design 56-57 (2001) 59
- 4) 濱田一弥ら：低温工学 37(2002)257
- 5) R. Zanino, et al.: Adv. Cryog. Eng. 47 (2002)364
- 6) K. Hamada, et al.: Proceedings of ICEC-19 (2002)157
- 7) N. Koizumi, et al.: Fusion Eng. and Design, 58-59 (2001) 1
- 8) M. Sugimoto, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 10 (2000)564
- 9) K. Hamada, et al.: Adv. Cryog. Eng. 47 (2002)407
- 10) E. Salpietro: IEEE Trans Appl. Supercond. 12 (2002) 623
- 11) S. Nicolle, et al.: Proceedings of ICEC-19 (2002)161
- 12) O. Filatov, et al.: IEEE Trans. Magn. 12 (2002)548
- 13) A. Nyilas : FZK Database (私信)
- 14) 花井 哲ら：低温工学 33(1998)18
- 15) 濱田一弥ら：低温工学 33(1998)467