

JAERI-M
93-065

チタンコンジットを用いた $(Nb,Ti)_3Sn$
ケーブル・イン・コンジット超電導導体の開発

1993年3月

和田山芳英*・安藤 俊就・中嶋 秀夫・西 正孝
樋上 久彰**・保川 幸雄・辻 博史

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

チタンコンジットを用いた $(Nb, Ti)_3Sn$ ケーブル・イン・
コンジット超電導導体の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

和田山芳英*・安藤 俊就・中嶋 秀夫・西 正孝

樋上 久彰**・保川 幸雄・辻 博史

(1993年2月24日受理)

核融合炉に用いられる超電導マグネットはプラズマを閉じ込めるための大型の高磁界発生装置である。マグネットに作用する電磁力は強大であり、その電磁力を支持するために超電導導体も強度部材として機能させる方法がとられる。このために超電導素線を多数本撲ってステンレス鋼の気密管に挿入したケーブル・イン・コンジット型の導体が開発されてきた。しかし、これまでに製作された Nb_3Sn 系素線からなるケーブルをステンレス鋼製のコンジットに挿入したケーブル・イン・コンジット導体では、その臨界電流特性が構成素線の臨界電流の撲線本数倍と比較して2~4割も低下することが避け難かった。これは素線内部の Nb_3Sn 超電導フィラメントとコンジット材であるステンレス鋼の熱収縮率が大きく異なるため、使用温度の4.2Kにおいて超電導フィラメントが臨界電流の低下をもたらす過度の圧縮歪をコンジット材から受けるためである。

本研究では、このケーブル・イン・コンジット導体の臨界電流特性の低下を抑制するために、 $(Nb, Ti)_3Sn$ 超電導フィラメントと熱収縮率が同等である純チタンをコンジット材へ適用することを試みた。実験ではチタンコンジット材の有効性を確認するために、提案したチタン及び従来材のステンレス鋼及び銅ニッケル合金の3種類のコンジットに対してコンジット内空隙率(ボイド率)を種々変化させたケーブル・イン・コンジット導体を作製し、臨界電流特性を測定比較した。

実験結果より、ステンレス鋼コンジット導体においては約2~4割の臨界電流の低下が認められたが、チタンコンジット導体では低下が認められず素線本来の特性が保持されており、チタンコンジットをケーブル・イン・コンジット導体へ適用することの有効性が確認された。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

* 外来研究員：(株)日立製作所

** 富士電機(株)

The Effect of Ti Conduit on the Critical Current in
 $(Nb, Ti)_3 Sn$ Cable-in-conduit Conductors

Yoshihide WADAYAMA*, Toshinari ANDO, Hideo NAKAJIMA
Masataka NISHI, Hisaaki HIUE**, Yukio YASUKAWA
and Hiroshi TSUJI

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 24, 1993)

The effect of titanium conduit on the critical current in $(Nb, Ti)_3 Sn$ cable-in-conduit conductors was investigated to obtain a high performance conductor which would be applied to large superconducting magnets such as those for fusion machines.

Titanium has equivalent thermal contraction coefficient to that of $(Nb, Ti)_3 Sn$ filaments, and it is expected by using titanium as the conduit to suppress degradation of critical current due to excess thermal prestrain on $(Nb, Ti)_3 Sn$ filaments. Some titanium conduit sample conductors were made, and their critical current performances were measured together with some stainless steel (SUS316) and copper-nickel alloy (Cu-10Ni) conduit conductors.

The experimental results indicated that the titanium conduit conductors had no critical current degradation due to thermal strain, whereas the stainless steel and copper-nickel alloy conduit conductors showed remarkable degradation on their critical current performance and greater degradation was observed with smaller void conductor.

* on leave from Hitachi Ltd.

** Fuji Electric Co., Ltd.

In conclusion, titanium is verified to be excellent conduit material for $(Nb, Ti)_3 Sn$ cable-in-conduit conductors.

Keywords : Cable-in-conduit Conductor, Titanium Conduit, Critical Current, Strain Effect, $Nb_3 Sn$, Superconducting Magnet, Fusion Machine

目 次

1.はじめに	1
2.超電導線材の臨界電流に及ぼす歪効果	1
3.試験方法	2
3.1 供試導体	2
3.2 測定治具及び測定方法	3
4.結果及び考察	3
4.1 素線及び導体の臨界電流測定結果	3
4.2 n 値の算出結果	4
4.3 臨界電流に及ぼす電磁力の影響	5
4.4 素線の内部歪に及ぼすコンジット材の影響	6
5.今後の課題と展開	7
6.結論	7
謝 辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Effect of Intrinsic Strain on Critical Current for Superconductor ...	1
3. Experimental	2
3.1 Sample Conductors	2
3.2 Apparatus	3
4. Results and Discussion	3
4.1 Critical Current of Sample Conductors	3
4.2 Resistive Transition Index	4
4.3 Effect of Magnetic Force on Critical Current for Sample Conductors	5
4.4 Calculation of Intrinsic Strain for Nb ₃ Sn Filament	6
5. Subjects	7
6. Conclusion	7
Acknowledgements	8
References	8

1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor ; ITER) のトロイダルコイルやポロイダルコイル用の超電導導体としてケーブル・イン・コンジット型強制冷凍導体が選定された [1]。このケーブル・インコンジット導体は①機械的強度が優れる、②導体表面に厚い絶縁膜が被覆できるため絶縁耐圧が高い、③液体ヘリウム槽が不要等の強制冷凍導体としての一般的長所を有しているのに加え、④高い安定性と低い交流損失が確保できるという特徴を有し、核融合用等の大型マグネット用導体として注目されている。原研においても実証ポロイダルコイル (DPC) 計画 [2] の中で DPC-EX [3], DPC-TJ [4] の各コイルに Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体を採用し研究開発を進めてきた。

Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体が最初に適用された大型コイルは LCT 計画 [5] で製作された LCT-WH コイル (米国, Westinghouse 社製) であったが、コイルの性能評価において導体の臨界電流特性に大きな低下が認められた [6]。これは素線内部の Nb₃Sn 超電導フィラメントとコンジット材として採用した JBK-75 (ステンレス系 Fe 基超合金) の熱収縮率が大きく異なるため、極低温において超電導フィラメントが過度の圧縮歪を受けその臨界電流特性が低下したことが原因といわれている。

本課題を解決するために Steeves 等は Nb₃Sn 超電導フィラメントと熱収縮率が同等である Incoloy908 (ステンレス系 Ni 基超合金) を開発し、これをコンジット材として適用した Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体を用いて US-DPC コイルを製作し、その試験においてその臨界電流特性に低下がないことを実証した [7]。しかし、この Incoloy908 は磁性を有するため補正コイルによるクエンチ検出法が適用できない等の問題が残されていた。

本研究では、このケーブル・イン・コンジット導体の臨界電流特性の低下を抑制するために、Nb₃Sn 超電導フィラメントと熱収縮率が同等であり、かつ完全非磁性である純チタンをコンジット材へ適用すること試みた [8]。実験ではチタンコンジット材の有効性を確認するために、提案したチタン及び従来材であるステンレス鋼及び銅ニッケル合金の 3 種類に対してボイド率を種々変化させたケーブル・イン・コンジット導体を作製し、臨界電流特性を測定した。

2. 超電導線材の臨界電流に及ぼす歪効果

一般に超電導素線はその電磁気的安定性を向上させる観点から、超電導フィラメントを安定化銅の内部に多数本内蔵させた極細多心線構造を採用している。例えばブロンズ法素線では多数の Nb 芯をブロンズ内部に埋め込んだ部材を安定化銅の内部に配置したビレットを減面加工して長尺細線化し、その後約 700 °C の反応熱処理を施すことによって Nb 芯とブロンズの界面にフィラメント状の Nb₃Sn 超電導相を生成させる。従って生成した超電導フィラメントは高温で熱的平衡を保っており、熱処理後に室温まで、さらに使用温度の極低温 (4.2K) にまで冷却さ

1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor ; ITER) のトロイダルコイルやポロイダルコイル用の超電導導体としてケーブル・イン・コンジット型強制冷凍導体が選定された [1]。このケーブル・インコンジット導体は①機械的強度が優れる、②導体表面に厚い絶縁膜が被覆できるため絶縁耐圧が高い、③液体ヘリウム槽が不要等の強制冷凍導体としての一般的長所を有しているのに加え、④高い安定性と低い交流損失が確保できるという特徴を有し、核融合用等の大型マグネット用導体として注目されている。原研においても実証ポロイダルコイル (DPC) 計画 [2] の中で DPC-EX [3], DPC-TJ [4] の各コイルに Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体を採用し研究開発を進めてきた。

Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体が最初に適用された大型コイルは LCT 計画 [5] で製作された LCT-WH コイル (米国, Westinghouse 社製) であったが、コイルの性能評価において導体の臨界電流特性に大きな低下が認められた [6]。これは素線内部の Nb₃Sn 超電導フィラメントとコンジット材として採用した JBK-75 (ステンレス系 Fe 基超合金) の熱収縮率が大きく異なるため、極低温において超電導フィラメントが過度の圧縮歪を受けその臨界電流特性が低下したことが原因といわれている。

本課題を解決するために Steeves 等は Nb₃Sn 超電導フィラメントと熱収縮率が同等である Incoloy908 (ステンレス系 Ni 基超合金) を開発し、これをコンジット材として適用した Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体を用いて US-DPC コイルを製作し、その試験においてその臨界電流特性に低下がないことを実証した [7]。しかし、この Incoloy908 は磁性を有するため補正コイルによるクエンチ検出法が適用できない等の問題が残されていた。

本研究では、このケーブル・イン・コンジット導体の臨界電流特性の低下を抑制するために、Nb₃Sn 超電導フィラメントと熱収縮率が同等であり、かつ完全非磁性である純チタンをコンジット材へ適用すること試みた [8]。実験ではチタンコンジット材の有効性を確認するために、提案したチタン及び従来材であるステンレス鋼及び銅ニッケル合金の 3 種類に対してボイド率を種々変化させたケーブル・イン・コンジット導体を作製し、臨界電流特性を測定した。

2. 超電導線材の臨界電流に及ぼす歪効果

一般に超電導素線はその電磁気的安定性を向上させる観点から、超電導フィラメントを安定化銅の内部に多数本内蔵させた極細多心線構造を採用している。例えばブロンズ法素線では多数の Nb 芯をブロンズ内部に埋め込んだ部材を安定化銅の内部に配置したビレットを減面加工して長尺細線化し、その後約 700 °C の反応熱処理を施すことによって Nb 芯とブロンズの界面にフィラメント状の Nb₃Sn 超電導相を生成させる。従って生成した超電導フィラメントは高温で熱的平衡を保っており、熱処理後に室温まで、さらに使用温度の極低温 (4.2K) にまで冷却さ

ると、主に安定化銅との熱収縮率の差異によって熱収縮歪が負荷されることになる。 Nb_3Sn 相は安定化銅により熱収縮率が小さいので極低温では超電導フィラメントの軸方向に圧縮歪が残る。

Nb_3Sn 等の化合物超電導体の臨界電流特性は歪負荷に敏感で、歪の負荷に伴って臨界電流が大きく低下する。この傾向は引張りと圧縮の両方向に対してほぼ同様であり、歪負荷が±0.4%の場合、臨界電流は約10% (at 12T) も低下する。なおブロンズ法素線の Nb_3Sn フィラメントが4.2Kで受ける圧縮歪は約0.25%になる。

ケーブル・イン・コンジット導体では素線を多数本コンジット材内部に配置させた構造である上に、 Nb_3Sn 生成熱処理がコンジットと共に実施されるため、 Nb_3Sn フィラメントに負荷される圧縮歪は安定化銅のみならずコンジット材の熱収縮率にも影響されるようになる。従って極低温での圧縮歪は素線単独の場合よりも大きくなり、導体の臨界電流は素線単独の特性の撲線本数倍より大幅に低下する傾向があった。

3. 試験方法

3.1 供試導体

超電導素線はブロンズ法で製造された $(Nb, Ti)_3Sn$ 線材である。その諸元は線径：1.0mm、銅比：2.0、フィラメント径： $3.4 \mu m$ 、フィラメント数：6606本である。なお素線表面には絶縁等の処理を施していない。ケーブル・イン・コンジット導体のコンジット材には純チタン (Ti) 及びステンレス鋼 (SUS316、鉄基超合金) 及び銅ニッケル合金 (Cu-10Ni) を用い、そのボイド率を5~45%の範囲で変化させた。Table 1は供試導体の諸元を示す。供試導体は2系列あり、A系列はボイド率が非常に小さく素線とコンジット材が密着しているものでコンジット材の影響を、B系列はボイド率の影響を検討するために作製したものである。

導体に用いたチタン素材は、シームレスパイプ (ASTM規格 繰目無管 Grade 2) で、内径φ4.7mm、外径φ10.0mmである。導体製作はコンジット内に素線を挿入した後、スエージングで所定のボイド率となるように減面加工した。

Fig.1は供試導体の形状・寸法を示す。導体は先端部で円弧状に曲げ加工されている。導体と電流リード用の銅板との接続は導体のコンジットを剥した後、素線を直線銅板に半田付けした。Fig.2は試料導体 (B系列、ボイド率37%) の断面写真を示す。

れると、主に安定化銅との熱収縮率の差異によって熱収縮歪が負荷されることになる。 Nb_3Sn 相は安定化銅により熱収縮率が小さいので極低温では超電導フィラメントの軸方向に圧縮歪が残る。

Nb_3Sn 等の化合物超電導体の臨界電流特性は歪負荷に敏感で、歪の負荷に伴って臨界電流が大きく低下する。この傾向は引張りと圧縮の両方向に対してほぼ同様であり、歪負荷が $\pm 0.4\%$ の場合、臨界電流は約10% (at 12T) も低下する。なおブロンズ法素線の Nb_3Sn フィラメントが4.2Kで受ける圧縮歪は約0.25%になる。

ケーブル・イン・コンジット導体では素線を多数本コンジット材内部に配置させた構造である上に、 Nb_3Sn 生成熱処理がコンジットと共に実施されるため、 Nb_3Sn フィラメントに負荷される圧縮歪は安定化銅のみならずコンジット材の熱収縮率にも影響されるようになる。従って極低温での圧縮歪は素線単独の場合よりも大きくなり、導体の臨界電流は素線単独の特性の撲線本数倍より大幅に低下する傾向があった。

3. 試験方法

3.1 供試導体

超電導素線はブロンズ法で製造された $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 線材である。その諸元は線径：1.0mm、銅比：2.0、フィラメント径： $3.4 \mu\text{m}$ 、フィラメント数：6606本である。なお素線表面には絶縁等の処理を施していない。ケーブル・イン・コンジット導体のコンジット材には純チタン (Ti) 及びステンレス鋼 (SUS316、鉄基超合金) 及び銅ニッケル合金 (Cu-10Ni) を用い、そのボイド率を5~45%の範囲で変化させた。Table 1は供試導体の諸元を示す。供試導体は2系列あり、A系列はボイド率が非常に小さく素線とコンジット材が密着しているものでコンジット材の影響を、B系列はボイド率の影響を検討するために作製したものである。

導体に用いたチタン素材は、シームレスパイプ (ASTM規格 繰目無管 Grade 2) で、内径 $\phi 4.7\text{mm}$ 、外径 $\phi 10.0\text{mm}$ である。導体製作はコンジット内に素線を挿入した後、スエージングで所定のボイド率となるように減面加工した。

Fig.1は供試導体の形状・寸法を示す。導体は先端部で円弧状に曲げ加工されている。導体と電流リード用の銅板との接続は導体のコンジットを剥した後、素線を直線銅板に半田付けした。Fig.2は試料導体 (B系列、ボイド率37%) の断面写真を示す。

Table 1 Main parameters of sample conductors.

Item	A series	B series
Inner diam.(mm)	2.8	-----
Outer diam.(mm)	3.8	8.6~10.0
Conductor length (mm)	540	720
Number of strands	7	$3 \times 3 \times 4 = 36$
Conduit materials	Ti, SUS316, Cu-10Ni	Ti, SUS316
Void fraction (%)	5	10, 17, 24, 30, 37, 44

3. 2 測定治具及び測定方法

3. 2. 1 測定治具

臨界電流の測定治具はFRP製円柱で試験導体を取り付けるための溝加工が施されている。導体は先端部を円弧状に曲げ加工されており、導体中を流れる電流の方向がこの部分で外部磁場と垂直となる。試料電圧を検出するための電圧タップはこの円弧状の領域の両端に設けた。電圧端子間距離はA, B系列が各々90, 180~200mmである。なおチタンコンジット導体の場合には電圧タップが通常の方法で半田付けできないため超音波半田で圧着した。

3. 2. 2 測定方法

外部磁場印加用の超電導マグネットとして試料導体AとBに対し、各々有効内径70mmと140mmのマグネットを使用し、9~13Tの磁場範囲で測定した。冷却は液体ヘリウム浸漬式である。なお試料電流の掃引速度は0.5~2kA/minで、通電方向は発生電磁力が円柱治具の中心側へ作用する方向とした。試料電流(I)と試料電圧(V)の測定にはXYレコーダを用いた。臨界電流の定義には比抵抗 $\rho = 1 \times 10^{-13} \Omega \text{ m}$ を用い、常電導転移に伴う電圧発生の様子を示すn値(resistive transition index)は試料電流(I)-試料電圧(V)曲線から $V \propto I^n$ の関係式におけるnをべき乗回帰計算することで算出した。n値算出の範囲は電界0.1~1.0 $\mu \text{V}/\text{cm}$ とした。

4. 結果及び考察

4. 1 素線及び導体の臨界電流測定結果

Table 2 はケーブル・イン・コンジット導体内に挿入した超電導素線の臨界電流を示す。測定に用いた素線試料形状はコイル状で、測定時の電磁力方向はコイル中心方向(圧縮)である。素線の非銅部断面積当たりの臨界電流密度は530A/mm² at 12Tであった。

Table 1 Main parameters of sample conductors.

Item	A series	B series
Inner diam.(mm)	2.8	-----
Outer diam.(mm)	3.8	8.6~10.0
Conductor length (mm)	540	720
Number of strands	7	$3 \times 3 \times 4 = 36$
Conduit materials	Ti, SUS316, Cu-10Ni	Ti, SUS316
Void fraction (%)	5	10, 17, 24, 30, 37, 44

3. 2 測定治具及び測定方法

3. 2. 1 測定治具

臨界電流の測定治具はFRP製円柱で試験導体を取り付けるための溝加工が施されている。導体は先端部を円弧状に曲げ加工されており、導体中を流れる電流の方向がこの部分で外部磁場と垂直となる。試料電圧を検出するための電圧タップはこの円弧状の領域の両端に設けた。電圧端子間距離はA, B系列が各々90, 180~200mmである。なおチタンコンジット導体の場合には電圧タップが通常の方法で半田付けできないため超音波半田で圧着した。

3. 2. 2 測定方法

外部磁場印加用の超電導マグネットとして試料導体AとBに対し、各々有効内径70mmと140mmのマグネットを使用し、9~13Tの磁場範囲で測定した。冷却は液体ヘリウム浸漬式である。なお試料電流の掃引速度は0.5~2kA/minで、通電方向は発生電磁力が円柱治具の中心側へ作用する方向とした。試料電流(I)と試料電圧(V)の測定にはXYレコーダーを用いた。臨界電流の定義には比抵抗 $\rho = 1 \times 10^{-13} \Omega \text{ m}$ を用い、常電導転移に伴う電圧発生の様子を示すn値(resistive transition index)は試料電流(I)-試料電圧(V)曲線から $V \propto I^n$ の関係式におけるnをべき乗回帰計算することで算出した。n値算出の範囲は電界0.1~1.0 $\mu \text{V/cm}$ とした。

4. 結果及び考察

4. 1 素線及び導体の臨界電流測定結果

Table 2 はケーブル・イン・コンジット導体内に挿入した超電導素線の臨界電流を示す。測定に用いた素線試料形状はコイル状で、測定時の電磁力方向はコイル中心方向(圧縮)である。素線の非銅部断面積当たりの臨界電流密度は530A/mm² at 12Tであった。

Table 2 Critical currents of strand

Fields (T)	9	10	11	12	13
Critical current (A)	246	205	169	138	111

note) Cross-sectional area of non-copper part: 0.262mm²

Fig.3はボイド率が約5%の導体の臨界電流と磁界の関係を示す。測定導体はA系列でコンジット材はチタン、ステンレス鋼、銅ニッケル合金の3種類である。なお図中にコンジット内に挿入した素線単独の臨界電流を撚線本数倍した値 ($I_c(\text{strand}) \times 7$) も併せて示した。

図よりステンレス鋼及び銅ニッケル合金の導体の臨界電流は、測定された全磁界領域において素線本来の特性より大幅に低下していることがわかる。これに対しチタンコンジット導体は臨界電流の低下が認められず、素線特性より高い値が得られた。

Fig.4は臨界電流の低下率に及ぼすボイド率と磁界の影響を示す。低下率は素線単独の臨界電流の撚線本数倍に対する測定値の割合とした。測定試料はB導体である。図よりステンレス鋼コンジット導体の場合にはボイド率の低下と共に、臨界電流の低下率が大きくなることがわかる。さらにボイド率が低いほど磁界の増加に伴って臨界電流の低下率が大きくなる傾向にある。これに対しチタンコンジット導体は全ての領域で低下が小さく高性能が保持されている。また低下率の磁界依存性もステンレス鋼コンジット導体の結果とは逆に磁界の増加に伴って若干高くなる傾向にある。

Fig.5は磁界12Tにおける臨界電流の低下率とボイド率の関係を示す。測定導体はA、Bの両試料で、ボイド率5%がA導体、10~44%がB導体である。測定結果は試料形状や素線数が異なる導体A、Bにおいて関連性ある結果が得られた。図よりステンレス鋼コンジット導体ではボイド率が20%以下の領域で臨界電流が約40%低下している。これに対してチタンコンジット導体はボイド率の減少と共に臨界電流が増加しており、ボイド率が30%以下の範囲で素線性能より高い臨界電流が得られた。ボイド率の小さな導体ほどコンジット材質の相違による差異が顕著に現れているのは、導体内部の素線とコンジット材との密着度が高く、コンジット材の熱収縮特性が超電導フィラメントに大きな影響を及ぼしているためと考えられる。

なお、ステンレス鋼コンジット導体の臨界電流がボイド率44%で低くなる結果が得られたが、この要因については明確にできなかった。ボイド率が40%以上になると電磁力によって撚線が受ける横圧縮の影響が大きくなり低い電流値でクエンすることが報告されている[9]が、測定された電流-電圧曲線は良好で電圧が急激に増加するような不安定現象は観察されなかった。

4.2 n値の算出結果

Fig.6は導体のn値に及ぼすボイド率の影響を示す。導体試料はA、Bの両系列で、コンジット材はチタン及びステンレス鋼である。図中に素線のn値も併せて示した。図よりボイド率が低い領域では素線とほぼ同等のnの値が、またボイド率が20%以上の領域ではボイド率の増加と共にn値が低くなる傾向が認められた。これはチタン及びステンレス鋼コンジット導体でほぼ同

様であった。ケーブル・イン・コンジット導体において n 値の示す本質的な意味は明確でないが、電圧発生の様子を示す定数として n 値をとらえるならば、ボイド率の高い導体ほど、 n 値が低く電圧発生は緩やかになる傾向にある。

またチタン及びステンレス鋼コンジット導体の臨界電流測定時に超電導状態であるにもかかわらず電流掃引と共に抵抗性の電圧が発生する現象が測定された。これは一般的には電流ターミナルと電圧端子の距離が短い場合（約5~10mm）に、電流が素線の安定化銅を経由して超電導フィラメントに流れ込む際に発生するカレントトランスファー抵抗（Current transfer resistance）と解釈されるが、本測定では電流ターミナルと電圧端子の距離は200mm以上で十分に長いため、分流に起因したものではないと考えられる。この抵抗性の電圧はチタン、ステンレス鋼コンジット導体の両方ともボイド率が高い導体において大きくなる傾向にあった。この要因として素線間の偏流に起因した電圧発生が考えられる。即ちコンジット内部の各素線に均一の電流が流れていなければ、この偏流解消に向かうために素線間に電流が流れ安定化銅等の領域で電圧が発生しているものである。従ってボイド率が大きな導体では素線間の密着度が低いため素線間の接触抵抗が大きく偏流解消のための電圧も高くなることが考えられる。

4.3 臨界電流に及ぼす電磁力の影響

導体の臨界電流特性は、素線内部の超電導フィラメントの歪状態によって大きく変化する。そこで測定時の磁場方向を逆転させることで導体に作用する電磁力方向、即ち素線の歪負荷方向を変化させ、臨界電流への影響を検討した。Table 3は電磁力方向が異なる条件で測定した素線単独及び導体の臨界電流特性を示す。

Table 3 Critical current of strand and conductors under different magnetic force directions at 12T.

Item	Ic (compression)	Ic (tension)	Ic (tens) / Ic (comp)
Strand	138	147	1.07
Conductor (Vf = 5%), SUS	740	745	1.01
Conductor (Vf = 38%), Ti	4680	5640	1.21

Unit : A

表より素線・導体の両方とも引張歪を受ける電磁力方向で臨界電流が高くなることがわかる。これは極低温に冷却されることで生じる素線内部の超電導フィラメントの受けている圧縮歪が電磁力による引張り負荷で緩和されるためである。ここでボイド率が5%の導体では電磁力による臨界電流の変化が非常に小さいが、これは素線がコンジットに密着し素線の軸変形がコンジットで拘束されているためと考えられる。即ち素線内部の超電導フィラメントの歪状態に及ぼすコンジット材の影響はボイド率の小さい導体ほど顕著であることがわかる。

4.4 素線の内部歪に及ぼすコンジット材の影響

上記の実験結果により超電導フィラメントとコンジット材の熱膨張率が異なることによって極低温におけるフィラメントの歪状態が変化し、その臨界電流特性が変化したことが明らかとなった。そこでケーブル・イン・コンジット導体の素線内部における $(Nb, Ti)_3Sn$ 超電導フィラメントの内部歪を計算することにより、導体の臨界電流特性に及ぼすコンジット材の影響を検討した。超電導フィラメントの軸方向歪は Steeves 等 [10] により次式で与えられる。なお本式は素線とコンジット材が完全に密着している状態を仮定している。

$$\varepsilon = \frac{A_c E_c (\Delta L/L_c - \Delta L/L_f) - \sigma_{cuy} A_{cu} - \sigma_{bz} A_{bz}}{A_f E_f + A_c E_c} \quad (1)$$

ここで、記号 σ : 軸方向応力, A : 体積占有率, E : 弾性率, $\Delta L/L$: 熱収縮率

添字 f : Nb_3Sn フィラメント, c : コンジット, cu : 安定化銅, bz : ブロンズ

なお、 Nb_3Sn フィラメントとコンジットの熱収縮量は Fig.7 に示す Nb_3Sn , ステンレス鋼, 純チタンの熱収縮量の温度依存性 [10] より求めた。Table 4 は計算に用いた導体の構成要素の諸元を示す。また、銅とブロンズの応力は冷却時過程で降伏しているものと仮定し、 $\sigma_{cuy} = 21\text{MPa}$, $\sigma_{bz} = 119\text{MPa}$ で一定であるとした。

Table 4 Parameters of conductor components

Component	A (mm^2)	E (GPa)	$\Delta L/L$ (%)
Nb_3Sn	0.42	165	- 0.78
Cu	3.67	124	- 1.68
Bronze	1.05	124	- 1.74
SUS316	5.18	208	- 1.75
Cu - Ni	5.18	141	- 1.44
Ti	5.18	129	- 0.83

Fig.8 は式 (1) で算出された素線内部 Nb_3Sn 超電導フィラメントの内部歪と臨界電流の関係を示す。試料はボイド率が非常に小さく素線とコンジット材との密着が大きい A 系列で、磁界は 12T である。 I_c/I_{cm} は Nb_3Sn 超電導フィラメントの内部歪がゼロの場合の最大臨界電流と測定された値との割合を表す。また図中の曲線は Ekin による Nb_3Sn 素線の一般的な歪依存性 [11] を示す。Table 4 を用いて算出した内部歪はステンレス鋼, 銅ニッケル合金, チタンの導体において各々 - 0.93 %, - 0.63 %, - 0.07 % であった。図よりチタン及び銅ニッケル合金導体の臨界電流の変化率は計算値と良く一致している。従ってチタン導体の特性が素線特性を上回ること及び銅ニッケル合金の導体の特性低下が、超電導フィラメントとコンジット材の熱収縮

差に起因したものであることがわかる。なお、ステンレス鋼導体の特性劣化は計算された結果と若干異なっているが、これは素線とコンジット材との間で滑り等が生じ超電導フィラメントの圧縮歪が緩和されることによって臨界電流の低下が小さくなつたためと考えられる。

5. 今後の課題と展開

1) チタンコンジット導体への電圧タップの取付け

チタン表面には通常のPbSnでの半田付けができないため、本研究では電圧タップを超音波半田で圧着した。しかし超音波圧着はタップの接合強度が十分でないのに加え、接合に多くの時間を費やす。今後チタン材を適用したマグネット製作を考慮して、計測素子取付に関する対策・改善が必要である。

2) 実導体への適用

本研究で評価した導体試料は縮小サイズであったが、今後実機サイズの導体にチタンコンジットを適用して特性を評価し、その有効性を確認すると共に新たな課題等を抽出してゆくことが重要である。

6. 結論

ケーブル・イン・コンジット型導体の臨界電流特性の低下を抑制することを目的として、超電導フィラメントと熱収縮率が同等な純チタンをコンジット材に適用した導体を製作し、従来のステンレス鋼コンジット導体とその臨界電流特性を比較検討し、以下の結論を得た。

1.チタンコンジット導体の臨界電流特性は、導体内部の素線が本来有する特性を撲滅本数倍した値と同等であり、極低温におけるコンジット材と超電導フィラメントの熱収縮差に起因する特性低下は認められない。これに対しステンレス鋼及び銅ニッケル合金コンジットの導体では明らかな特性低下が認められた。

2.極低温において導体内部の超電導フィラメントが受ける熱収縮歪をSteevesの式によって計算し臨界電流の低下率を推定した結果は試験結果と良く一致した。従って臨界電流の低下が熱収縮歪に起因すること、及びチタンコンジットを適用することでこの低下が抑制できることが明らかとなった。

3.チタンコンジット導体は内蔵された素線本来の臨界電流特性を保持できる長所を有するのに加えて、完全非磁性であるためこの導体を巻線したコイルに補正コイルによるクエンチ検出法が適用できる。また近年チタン材は工業レベルで量産化されており、今後さらに信頼性ある超電導マグネットの製作に向けてチタンコンジット材の普及が期待される。

差に起因したものであることがわかる。なお、ステンレス鋼導体の特性劣化は計算された結果と若干異なっているが、これは素線とコンジット材との間で滑り等が生じ超電導フィラメントの圧縮歪が緩和されることによって臨界電流の低下が小さくなつたためと考えられる。

5. 今後の課題と展開

1) チタンコンジット導体への電圧タップの取付け

チタン表面には通常のPbSnでの半田付けができないため、本研究では電圧タップを超音波半田で圧着した。しかし超音波圧着はタップの接合強度が十分でないのに加え、接合に多くの時間を費やす。今後チタン材を適用したマグネット製作を考慮して、計測素子取付に関する対策・改善が必要である。

2) 実導体への適用

本研究で評価した導体試料は縮小サイズであったが、今後実機サイズの導体にチタンコンジットを適用して特性を評価し、その有効性を確認すると共に新たな課題等を抽出してゆくことが重要である。

6. 結論

ケーブル・イン・コンジット型導体の臨界電流特性の低下を抑制することを目的として、超電導フィラメントと熱収縮率が同等な純チタンをコンジット材に適用した導体を製作し、従来のステンレス鋼コンジット導体とその臨界電流特性を比較検討し、以下の結論を得た。

1.チタンコンジット導体の臨界電流特性は、導体内部の素線が本来有する特性を撲滅本数倍した値と同等であり、極低温におけるコンジット材と超電導フィラメントの熱収縮差に起因する特性低下は認められない。これに対しステンレス鋼及び銅ニッケル合金コンジットの導体では明らかな特性低下が認められた。

2.極低温において導体内部の超電導フィラメントが受ける熱収縮歪をSteevesの式によって計算し臨界電流の低下率を推定した結果は試験結果と良く一致した。従って臨界電流の低下が熱収縮歪に起因すること、及びチタンコンジットを適用することでこの低下が抑制できることが明らかとなった。

3.チタンコンジット導体は内蔵された素線本来の臨界電流特性を保持できる長所を有するのに加えて、完全非磁性であるためこの導体を巻線したコイルに補正コイルによるクエンチ検出法が適用できる。また近年チタン材は工業レベルで量産化されており、今後さらに信頼性ある超電導マグネットの製作に向けてチタンコンジット材の普及が期待される。

差に起因したものであることがわかる。なお、ステンレス鋼導体の特性劣化は計算された結果と若干異なっているが、これは素線とコンジット材との間で滑り等が生じ超電導フィラメントの圧縮歪が緩和されることによって臨界電流の低下が小さくなつたためと考えられる。

5. 今後の課題と展開

1) チタンコンジット導体への電圧タップの取付け

チタン表面には通常のPbSnでの半田付けができないため、本研究では電圧タップを超音波半田で圧着した。しかし超音波圧着はタップの接合強度が十分でないのに加え、接合に多くの時間を費やす。今後チタン材を適用したマグネット製作を考慮して、計測素子取付に関する対策・改善が必要である。

2) 実導体への適用

本研究で評価した導体試料は縮小サイズであったが、今後実機サイズの導体にチタンコンジットを適用して特性を評価し、その有効性を確認すると共に新たな課題等を抽出してゆくことが重要である。

6. 結論

ケーブル・イン・コンジット型導体の臨界電流特性の低下を抑制することを目的として、超電導フィラメントと熱収縮率が同等な純チタンをコンジット材に適用した導体を製作し、従来のステンレス鋼コンジット導体とその臨界電流特性を比較検討し、以下の結論を得た。

1.チタンコンジット導体の臨界電流特性は、導体内部の素線が本来有する特性を撲滅本数倍した値と同等であり、極低温におけるコンジット材と超電導フィラメントの熱収縮差に起因する特性低下は認められない。これに対しステンレス鋼及び銅ニッケル合金コンジットの導体では明らかな特性低下が認められた。

2.極低温において導体内部の超電導フィラメントが受ける熱収縮歪をSteevesの式によって計算し臨界電流の低下率を推定した結果は試験結果と良く一致した。従って臨界電流の低下が熱収縮歪に起因すること、及びチタンコンジットを適用することでこの低下が抑制できることが明らかとなった。

3.チタンコンジット導体は内蔵された素線本来の臨界電流特性を保持できる長所を有するのに加えて、完全非磁性であるためこの導体を巻線したコイルに補正コイルによるクエンチ検出法が適用できる。また近年チタン材は工業レベルで量産化されており、今後さらに信頼性ある超電導マグネットの製作に向けてチタンコンジット材の普及が期待される。

謝 詞

本研究の遂行にあたりご指導頂きました核融合工学部 島本進部長、ならびに実験にご協力頂きました超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] ITER MAGNETS IAEA/ITER Documentation series, No.26, IAEA, VIENNA, 1991.
- [2] H.Tsuji et al., "Evolution of the demo poroidal coil program", MT - 11, (1989), pp..806 – 811.
- [3] Y.Takahashi et al., "Experimantal results of the Nb₃Sn demo poroidal coil (DPC – EX)", Cryogenics, Vol.31, (1991), pp..640 – 644.
- [4] 西正孝他, DPC – TJ計画 – 核融合高電流密度大型コイルの開発 –, 低温工学, Vol.27, No.3, (1992), pp..25 – 34.
- [5] D.Beard et al., "The IEA large coil task", Fision Eng. and Design, Vol. 7, (1988).
- [6] L.Dresner, "Stability Test of Westinghouse coil in the International Fusion Superconducting Magnet Facility", IEEE Trans. Mag., MAG – 24, No.1, 1988, pp.779 – 783.
- [7] M.Steeves et al., "Tast Results from the US Demonstration Poloidal Coil Experiment", MIT Plasma Fusion Center Report PFC/RR – 92 – 1, 1992.
- [8] T.Ando et al., "The Effect of Ti Conduit on the Critical Current in the (NbTi)₃Sn Cable – in – conduit Conductors", Applied Superconducting Conference, 1992.
- [9] 西正孝他, Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体の臨界電流特性に及ぼすボイド率の効果, 第48回1992年度低温工学, 超電導学会講演概要集, 低温工学会 (1992), p.196.
- [10] M.Steeves and M.heonig, "Experimantal Parameter Study of Subsize Nb₃Sn Cable – in – conduit Conductors", IEEE Trans. Mag., MAG – 19, No.3, 1983, pp..374 – 377.
- [11] J.Ekin, "Strain Scaling Low and the Prediction of Uniaxial and Bending strain Effects in Multifilamentary Superconductors", Filamentray A – 15 Superconductors, Suenaga and Clark, eds., Plenum, New York, 1980, pp.. 187 – 204.

謝 詞

本研究の遂行にあたりご指導頂きました核融合工学部 島本進部長、ならびに実験にご協力頂きました超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] ITER MAGNETS IAEA/ITER Documentation series, No.26, IAEA, VIENNA, 1991.
- [2] H.Tsuji et al., "Evolution of the demo poroidal coil program", MT - 11, (1989), pp..806 – 811.
- [3] Y.Takahashi et al., "Experimantal results of the Nb₃Sn demo poroidal coil (DPC – EX)", Cryogenics, Vol.31, (1991), pp..640 – 644.
- [4] 西正孝他, DPC – TJ計画 – 核融合高電流密度大型コイルの開発 –, 低温工学, Vol.27, No.3, (1992), pp..25 – 34.
- [5] D.Beard et al., "The IEA large coil task", Fision Eng. and Design, Vol. 7, (1988).
- [6] L.Dresner, "Stability Test of Westinghouse coil in the International Fusion Superconducting Magnet Facility", IEEE Trans. Mag., MAG – 24, No.1, 1988, pp.779 – 783.
- [7] M.Steeves et al., "Tast Results from the US Demonstration Poloidal Coil Experiment", MIT Plasma Fusion Center Report PFC/RR – 92 – 1, 1992.
- [8] T.Ando et al., "The Effect of Ti Conduit on the Critical Current in the (NbTi)₃Sn Cable – in – conduit Conductors", Applied Superconducting Conference, 1992.
- [9] 西正孝他, Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体の臨界電流特性に及ぼすボイド率の効果, 第48回 1992年度低温工学, 超電導学会講演概要集, 低温工学会 (1992), p.196.
- [10] M.Steeves and M.heonig, "Experimantal Parameter Study of Subsize Nb₃ Sn Cable – in – conduit Conductors", IEEE Trans. Mag., MAG – 19, No.3, 1983, pp..374 – 377.
- [11] J.Ekin, "Strain Scaling Low and the Prediction of Uniaxial and Bending strain Effects in Multifilamentary Superconductors", Filamentray A – 15 Superconductors, Suenaga and Clark, eds., Plenum, New York, 1980, pp.. 187 – 204.

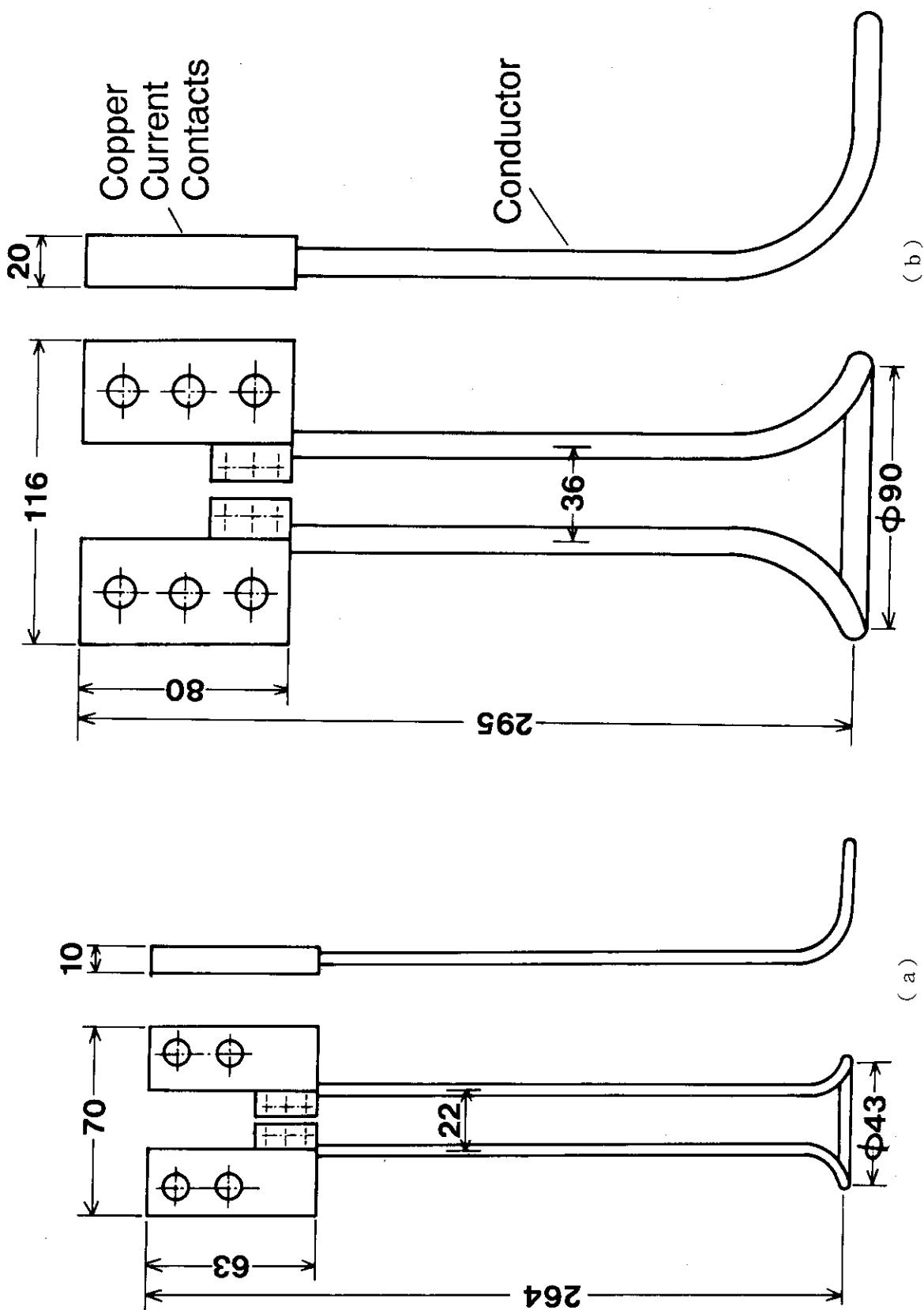


Fig. 1 Configuration of cable-in-conductor samples.

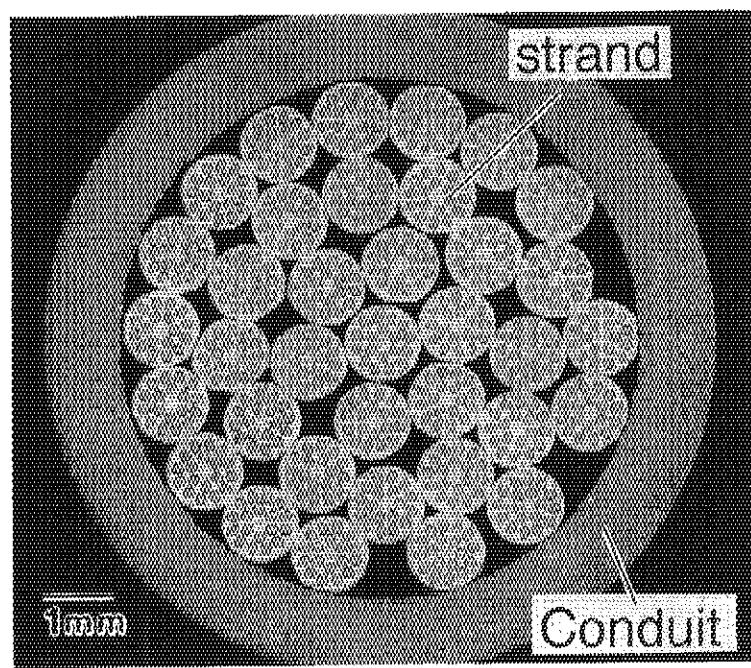


Fig. 2 Enlarged cross - sectional view of a sample conductor.
Conduit material : Ti, Void fraction : 37 %

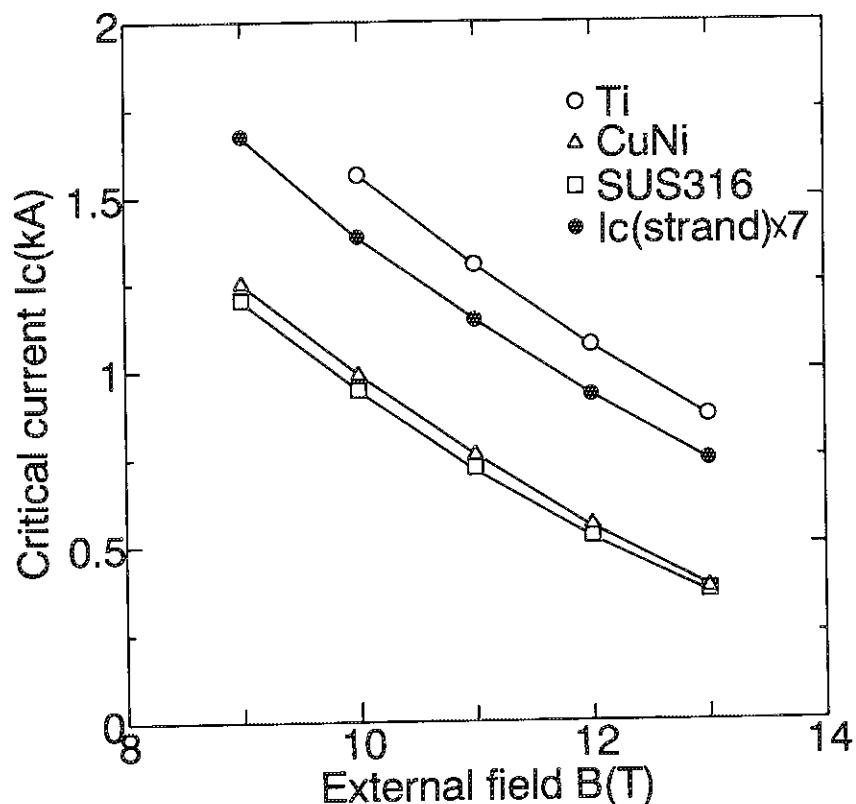


Fig. 3 Results of critical current measurments for A series samples.
(void fraction 5 %)

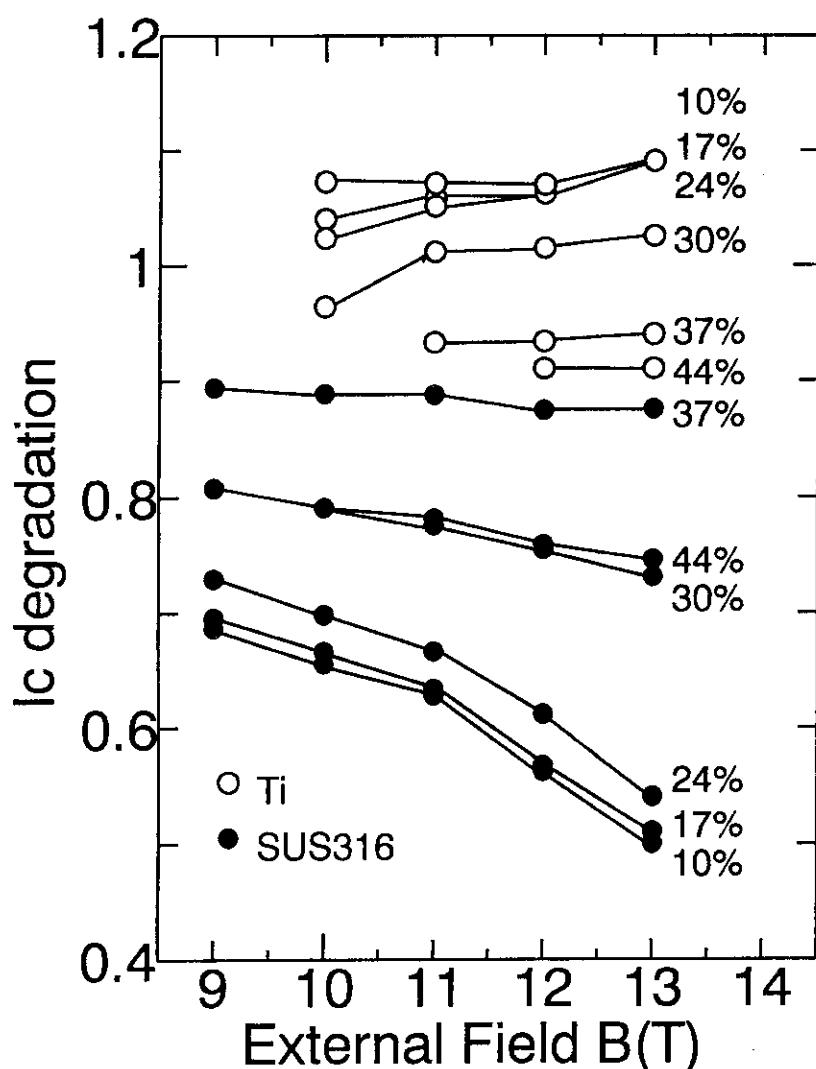


Fig. 4 Effect of void fraction and external field on critical current of sample conductors with Ti and stainless steel conduit.

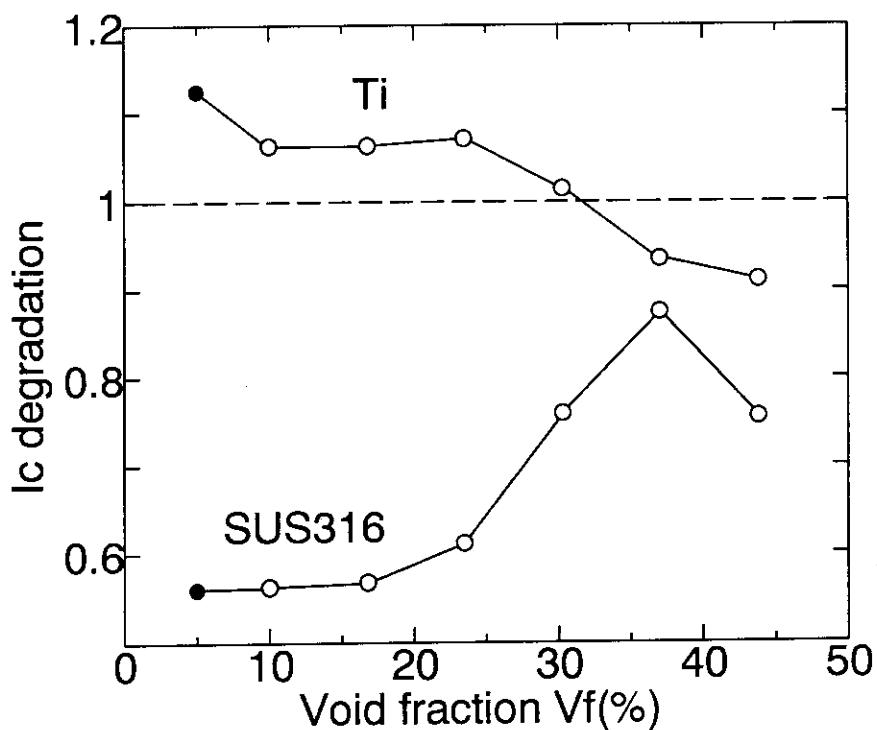


Fig. 5 Effect of void fraction on critical current of sample conductors with Ti and stainless steel conduit at 12T.

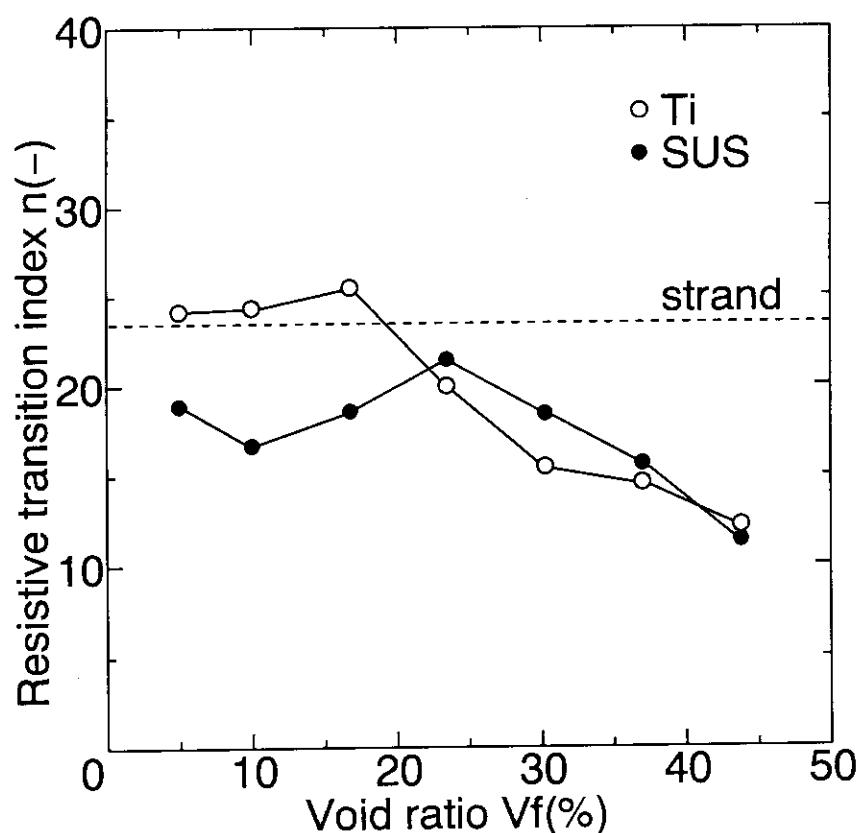


Fig. 6 Relation between void fraction and resistive transition index (n - value) of sample conductors.

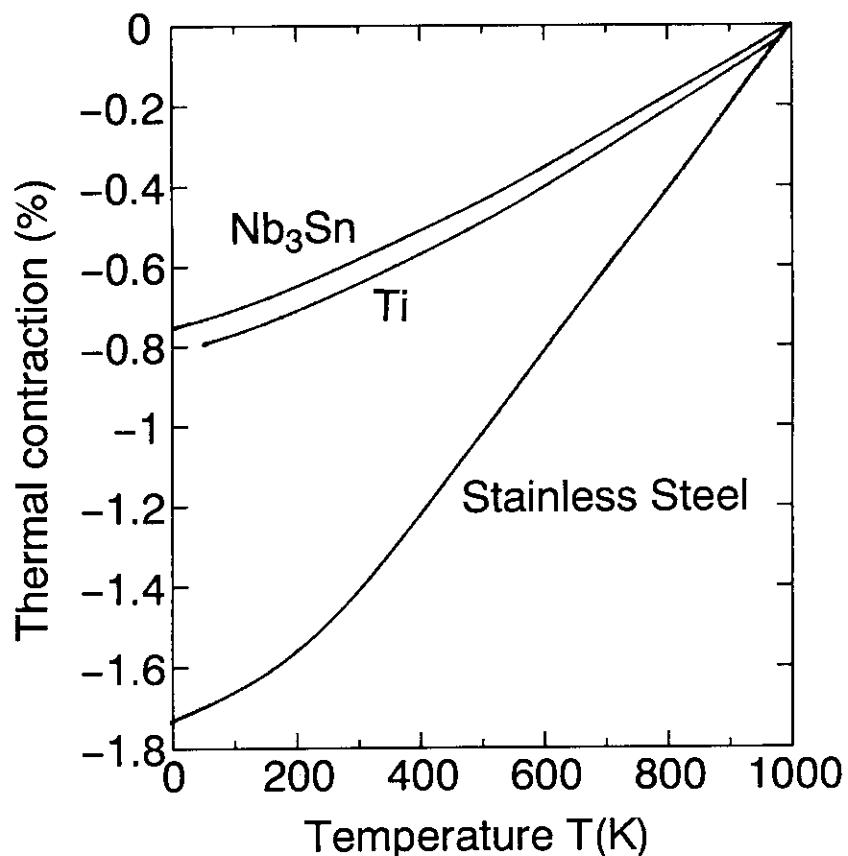


Fig. 7 Thermal contraction of Nb₃Sn, stainless steel and Ti materials.

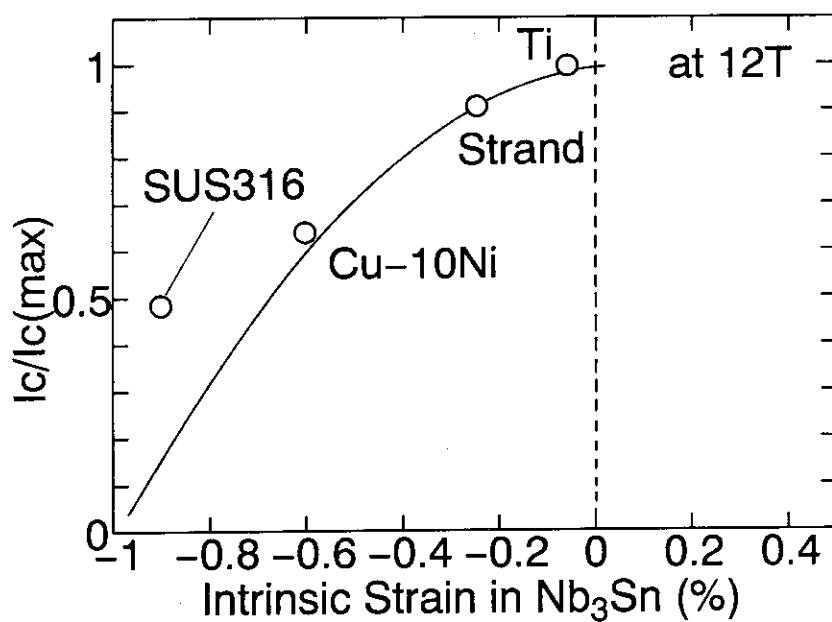


Fig. 8 Relation between intrinsic strain of Nb₃Sn filament and normalized critical current at 12T.