

JAERI-Research
96-013



ITER原型コイル用素線の臨界電流および 交流損失に関する国内共通試験結果

1996年3月

和田山芳英*・高橋良和・西 正孝・磯野高明・辻 博史

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

本レポートは、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、お申し越しください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 核原子力資料サービス

ITER 原型コイル用素線の臨界電流および交流損失に関する国内共通試験結果

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

和田山芳英*・高橋 良和・西 正孝・磯野 高明
辻 博史

(1996年2月6日受理)

国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER) の工学設計活動 (Engineering Design Activity; EDA) の中で、超電導マグネット関連の研究開発が推進されている。これら超電導マグネット開発の中で、超電導素線の特性を向上させることは非常に重要な開発項目の一つであり、また開発素線の特性を信頼性ある手法で測定評価することは必要不可欠な基本技術である。

本研究では原研及び国内の超電導線材メーカーに対して、測定評価の現状を把握し測定結果が相互に整合性あるものにするための指針を得ることを目的として、試験装置・方法に関するアンケート調査と国内共通試験を実施した。

共通試験には ITER CS コイル用 $(Nb, Ti)_3Sn$ 素線と参照用 Nb-Ti 素線を用い、測定項目は臨界電流と交流損失とした。測定評価法には ITER-EDA で決定された推奨法を極力準拠する方式を採用した。共通試験の参加機関は原研、日立電線、古河電工、住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼の計 7 機関である。

試験結果より、臨界電流のばらつきは $(Nb, Ti)_3Sn$ 素線が 4.5% at 12 T, Nb-Ti 素線が 1.7% at 9 T, 磁化ヒステリシスのばらつきは $(Nb, Ti)_3Sn$ 素線及び、Nb-Ti 素線で約 15% at ± 3 T の結果が得られると共に、各参加機関の現状が把握された。

Results of Intercomparison Test of the Critical Current and AC Loss Measurement
on Superconducting Strands for the ITER Coil

Yoshihide WADAYAMA*, Yoshikazu TAKAHASHI, Masataka NISHI
Takaaki ISONO and Hiroshi TSUJI

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

(Received February 6, 1996)

Round robin tests of critical and hysteresis loss measurement on superconducting strands were carried out by JAERI and Japanese company-laboratories. The test samples are a $(Nb, Ti)_3Sn$ strand for the ITER CS model coil and a Nb-Ti reference strand. The testing condition and evaluation method are based upon ITER-EDA standard. Participant company-laboratories in round robin test program are Hitachi Cable, Furukawa electric, Sumitomo electric industries, Showa electric wire and cable, Mitsubishi electric, Kobe steel, From the test results, the coefficient of variation of critical currents at 12 T in $(Nb, Ti)_3Sn$ strand was 4.5% and at 9 T in NbTi strand was 1.7%, and the coefficient of variations of hysteresis loss at ± 3 T in both $(Nb, Ti)_3Sn$ and NbTi strands were 15%. Status of critical current and hysteresis loss measurement on superconducting strands in Japanese laboratories was recognized through the round robin test.

Keywords: ITER, Superconducting, NbTi, Nb_3Sn , Critical Current, AC Loss,
Hysterisis Loss

* on leave from Hitachi Ltd.

目 次

1.はじめに	1
2.共通試験の基本方針と概要	1
2.1 基本方針	1
2.2 共通試験の概要	2
3.試験方法	2
3.1 供試素線	2
3.2 測定方法	3
4.結果および考察	4
4.1 臨界電流	4
4.2 交流損失	8
5.結論	10
謝辞	11
参考文献	11
付録	12

Contents

1. Introduction	1
2. Objectives and Outlines of Round Robin Test	1
2.1 Objectives	1
2.2 Outlines of Round Robin Test	2
3. Experimental Method	2
3.1 Sample Strands	2
3.2 Measurement Conditions	3
4. Results and Discussion	4
4.1 Critical Current	4
4.2 AC Loss	8
5. Conclusion	10
Acknowledgments	11
References	11
Appendix	12

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER)の工学設計活動(Engineering Design Activity;EDA)が1992年より開始され、国際協力のもとで超電導マグネット関連の工学基本設計、実証試験等の研究開発が多方面にわたって推進されてきた[1]。参加4極の日本側を代表する原研においても中心ソレノイドコイルやトロイダルコイル用の超電導線材の開発を勢力的に進め、高電流密度・低損失型 $(Nb,Ti)_3Sn$ [2]、及び耐ひずみ特性に優れた次世代線材Nb₃Al [3]の素線・導体の開発において、これまでに数多くの成果を上げてきた。

これら超電導マグネット開発の中で、超電導素線の特性を向上させることは非常に重要な開発項目の一つであり、また開発素線の特性を信頼性ある手法で測定評価することは必要不可欠な基本技術である。

現在、超電導線材を開発・製作する電線メーカーにおいては、長年の経験に基づいた独自の測定法が各々に確立されており、開発素線の特性もこの方法に従って評価されてきた。しかし、超電導素線の特性評価法に関する統一規格は、ベルサイユサミット協定新材料の試験評価技術に関する国際共同研究(VAMAS)[4]、国際電気標準会議(IEC-TC90) [5]等の標準化の動きがあるものの制定までには至っていないため、原研及び電線各社間の測定評価法には若干の相違が認められる。結果として、電線メーカーが開発・製作した素線の特性を原研と電線メーカー間で相互に比較する際に不整合が生じることがあった。今後の超電導素線の開発・製作を進める上で、このような不整合を解消し信頼性ある測定結果を得ることは重要な課題である。これに対応してITER-EDAの中でも超電導線材の特性評価法を統一するための推奨法がまとめられた状況にある。

本研究では上記課題を解消すべく、原研および国内の超電導線材メーカーに対して、素線の基本特性である臨界電流と交流損失に関する共通試験を実施し、参加メーカーの測定評価の現状を把握すると共に、測定結果が相互に整合性あるものにするための指針を得ることを目的とした。

2. 共通試験の基本方針と概要

2. 1 基本方針

本作業の目的は原研および国内の超電導線材メーカーの臨界電流、交流損失に関する測定評価法の現状を把握し、測定結果を相互に整合性あるものにすることである。その基本方針を以下に示す。

- 1) ITER-EDAで決定された測定法、及びこれまでの標準化活動（VAMAS等）で得られた推奨法を、共通試験法として採用する。
 - ・ただし参加メーカーの現有装置、治具等に大幅な改造がないよう極力考慮する。
- 2) 測定結果が一致することに主眼を置く。

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER)の工学設計活動(Engineering Design Activity;EDA)が1992年より開始され、国際協力のもとで超電導マグネット関連の工学基本設計、実証試験等の研究開発が多方面にわたって推進されてきた[1]。参加4極の日本側を代表する原研においても中心ソレノイドコイルやトロイダルコイル用の超電導線材の開発を勢力的に進め、高電流密度・低損失型 $(Nb,Ti)_3Sn$ [2]、及び耐ひずみ特性に優れた次世代線材Nb₃Al [3]の素線・導体の開発において、これまでに数多くの成果を上げてきた。

これら超電導マグネット開発の中で、超電導素線の特性を向上させることは非常に重要な開発項目の一つであり、また開発素線の特性を信頼性ある手法で測定評価することは必要不可欠な基本技術である。

現在、超電導線材を開発・製作する電線メーカーにおいては、長年の経験に基づいた独自の測定法が各々に確立されており、開発素線の特性もこの方法に従って評価されてきた。しかし、超電導素線の特性評価法に関する統一規格は、ベルサイユサミット協定新材料の試験評価技術に関する国際共同研究(VAMAS)[4]、国際電気標準会議(IEC-TC90) [5]等の標準化の動きがあるものの制定までには至っていないため、原研及び電線各社間の測定評価法には若干の相違が認められる。結果として、電線メーカーが開発・製作した素線の特性を原研と電線メーカー間で相互に比較する際に不整合が生じることがあった。今後の超電導素線の開発・製作を進める上で、このような不整合を解消し信頼性ある測定結果を得ることは重要な課題である。これに対応してITER-EDAの中でも超電導線材の特性評価法を統一するための推奨法がまとめられた状況にある。

本研究では上記課題を解消すべく、原研および国内の超電導線材メーカーに対して、素線の基本特性である臨界電流と交流損失に関する共通試験を実施し、参加メーカーの測定評価の現状を把握すると共に、測定結果が相互に整合性あるものにするための指針を得ることを目的とした。

2. 共通試験の基本方針と概要

2. 1 基本方針

本作業の目的は原研および国内の超電導線材メーカーの臨界電流、交流損失に関する測定評価法の現状を把握し、測定結果を相互に整合性あるものにすることである。その基本方針を以下に示す。

- 1) ITER-EDAで決定された測定法、及びこれまでの標準化活動(VAMAS等)で得られた推奨法を、共通試験法として採用する。
 - ・ただし参加メーカーの現有装置、治具等に大幅な改造がないよう極力考慮する。
- 2) 測定結果が一致することに主眼を置く。

- ・計画当初から測定条件を変化させてその影響を検討することはせず、結果に相違が認められた場合にその要因を調査する。
- 3) 共通試験は、臨界電流、n値、有効フィラメント径、ヒステリシス損失の4項目とする。

2. 2 共通試験の概要

本作業に先立って、国内の超電導線材メーカーに対して測定基本案を提示すると共に、現有装置、測定法をアンケート調査した。本共通試験に参加した機関は日立電線、古河電工、住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼および原研の計7所である。なお、 $(Nb, Ti)_3Sn$ 測定サンプルの熱処理は、参加メーカーから熱処理ボビン入手し、原研側で一括処理した。以下に、共通試験の作業手順を示す。

- 1) 共通試験の趣意書、測定装置アンケートの送付と回収(1992.6～1992.7)
- 2) 測定サンプル ($Nb-Ti$ 線、 $(Nb, Ti)_3Sn$ 線) の入手(1992.8～1993.4)
- 3) 热処理ボビンを参加機関から受領(1993.5)
- 4) $(Nb, Ti)_3Sn$ サンプルの熱処理(1993.6)
- 5) 測定サンプルの配付(1993.7)
- 6) 測定結果の回収(1993.8～1993.12)
- 7) 結果の集計・検討(1994.1～)

3. 試験方法

3. 1 供試素線

共通試験に供した超電導素線はITER原型ポロイダルコイル用に原研が開発したブロンズ法 $(Nb, Ti)_3Sn$ および参照用 $Nb-Ti$ 素線の2種類である。合金系 $Nb-Ti$ 素線は臨界電流の測定結果のばらつきの主要因である素線への歪負荷の影響等を検討するために用いた。Table 1は供試素線の主要諸元、Fig.1はその断面写真を示す。 $(Nb, Ti)_3Sn$ 素線の熱処理条件は750°C, 200h(真空中)である。なお熱処理は原研側で一括処理することで超電導特性に及ぼす熱処理条件の影響を除去した。参加メーカーに配付したサンプル数は $(Nb, Ti)_3Sn$ 素線と $Nb-Ti$ 素線につき各々2本である。

Table 1 Main parameters of $(Nb, Ti)_3Sn$ test strand and $Nb-Ti$ reference strand

Superconductors	$(Nb, Ti)_3Sn$	$Nb-Ti$
Diameter(Φ mm)	0.92	0.68
Filament diameter (μ m)	2.4	27
Number of filaments	14641	-
Cu/non-Cu ratio	1.47	1.0
Twisting pitch (mm)	21.2	50

- ・計画当初から測定条件を変化させてその影響を検討することはせず、結果に相違が認められた場合にその要因を調査する。
- 3) 共通試験は、臨界電流、n値、有効フィラメント径、ヒステリシス損失の4項目とする。

2. 2 共通試験の概要

本作業に先立って、国内の超電導線材メーカーに対して測定基本案を提示すると共に、現有装置、測定法をアンケート調査した。本共通試験に参加した機関は日立電線、古河電工、住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼および原研の計7所である。なお、(Nb,Ti)₃Sn測定サンプルの熱処理は、参加メーカーから熱処理ボビンを入手し、原研側で一括処理した。以下に、共通試験の作業手順を示す。

- 1) 共通試験の趣意書、測定装置アンケートの送付と回収(1992.6～1992.7)
- 2) 測定サンプル (Nb-Ti線、(Nb, Ti)₃Sn線) の入手(1992.8～1993.4)
- 3) 热処理ボビンを参加機関から受領(1993.5)
- 4) (Nb, Ti)₃Snサンプルの熱処理(1993.6)
- 5) 測定サンプルの配付(1993.7)
- 6) 測定結果の回収(1993.8～1993.12)
- 7) 結果の集計・検討(1994.1～)

3. 試験方法

3. 1 供試素線

共通試験に供した超電導素線はITER原型ポロイダルコイル用に原研が開発したプロンズ法(Nb, Ti)₃Snおよび参照用Nb-Ti素線の2種類である。合金系Nb-Ti素線は臨界電流の測定結果のばらつきの主要因である素線への歪負荷の影響等を検討するために用いた。Table 1は供試素線の主要諸元、Fig.1はその断面写真を示す。(Nb, Ti)₃Sn素線の熱処理条件は750°C, 200h (真空中) である。なお熱処理は原研側で一括処理することで超電導特性に及ぼす熱処理条件の影響を除去した。参加メーカーに配付したサンプル数は(Nb, Ti)₃Sn素線とNb-Ti素線につき各々2本である。

Table 1 Main parameters of (Nb, Ti)₃Sn test strand and Nb-Ti reference strand

Superconductors	(Nb, Ti) ₃ Sn	Nb-Ti
Diameter(Φ mm)	0.92	0.68
Filament diameter (μm)	2.4	27
Number of filaments	14641	-
Cu/non-Cu ratio	1.47	1.0
Twisting pitch (mm)	21.2	50

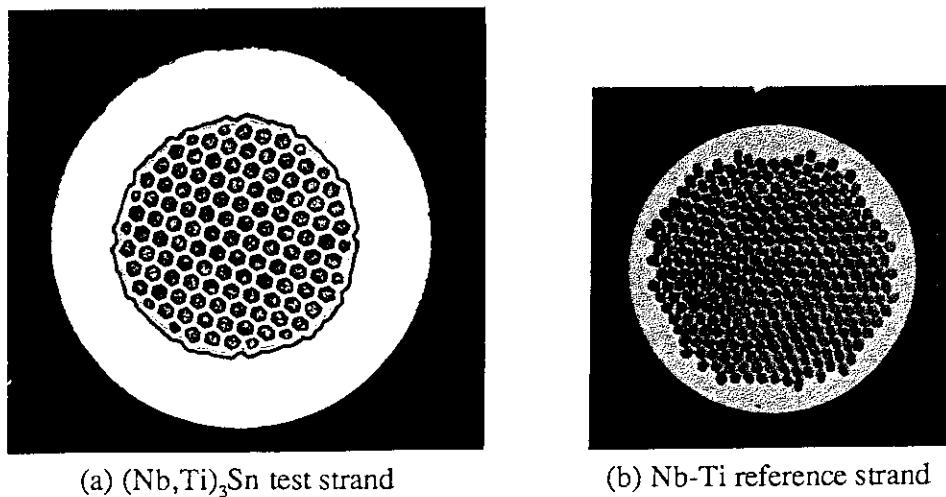


Fig.1 Enlarged cross-sectional view of the sample strands.

3. 2 測定方法

3. 2. 1 臨界電流

臨界電流の測定には直流四端子法を用い、外部磁界を印加した状態で試料電流(I)—試料電圧(V)を測定し、試料電圧が所定の電界値に達した時の試料電流から臨界電流を決定した。Table 2は共通試験の測定条件を示す。基本条件は原研より各参加メーカーに提示したが、測定ホルダーの材質はメーカー所有治具を極力使用できるよう考慮して、制限事項から除外した。なおメーカー別の測定条件の詳細は付録を参照されたい。

Table 2 Measurement conditions for critical current (○:Restricted conditions)

Items	ITER-EDA proposal	Present intercomparision
○Sample configuration	spiral on mandrel	←
Total length	at least 500mm	400~1000mm
Voltage tap length	at least 250mm	90~290mm
○Magnetic force direction	inward	←
○Temperature	4.2K(1)	←
○Magnetic field	12T(2)	9,10,11,12 ,13
○Criterion of I_c	$0.1 \mu \text{V}/\text{cm}$	←
○n-value	$0.1\text{--}1.0 \mu \text{V}/\text{cm}$ (3)	←
○Sample mount	—	Vacuum grease
○Current sweep rate	—	< 500A/min
Material of mandrel	—	GFRP, Phenol, Ceramics

(1) Helium bath temperature at atmospheric pressure

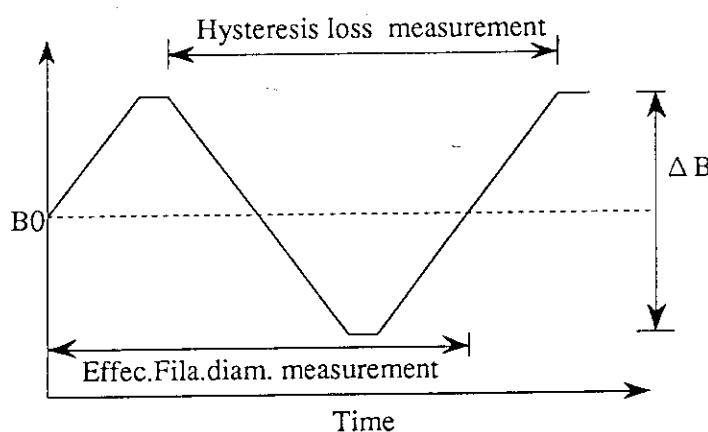
(2) Self field of strand will not be considered

(3) n-value is evaluated by $n=1/\log_{10} (I_c(1.0)/I_c(0.1))$

3. 2. 2 交流損失

交流損失の測定法は測定サンプルに外部磁界を印加し、サンプルの磁化曲線を測定することによって、その有効フィラメント径とヒステリシス損失を評価した。測定法は参加メーカによって異なり一般的な磁化法、振動試料型磁力計(VSM)、及び超電導量子干渉装置(SQUID)が用いられた。共通試験の測定条件をTable3に、参加メーカ別の測定法の詳細は付録(Table 2,3)を参照されたい。なお有効フィラメント径については磁化ヒステリシス幅 ΔB を測定・報告することで代用した。

Table 3 Measurement conditions for effective filament diameter and hysteresis loss.



Items	Effective filament diam.	Hysteresis loss
Background field(B0)	4,5,6T	0T
Amplitude field(ΔB)	0.5,1.0 ($\pm 0.25, 0.5$ T)	6T(± 3 T)
Ramp rate (dB/dt)	<6.6mT/s	<66mT/s
Temperature	4.2K	←

4. 結果および考察

4. 1 臨界電流

1) 共通試験の結果

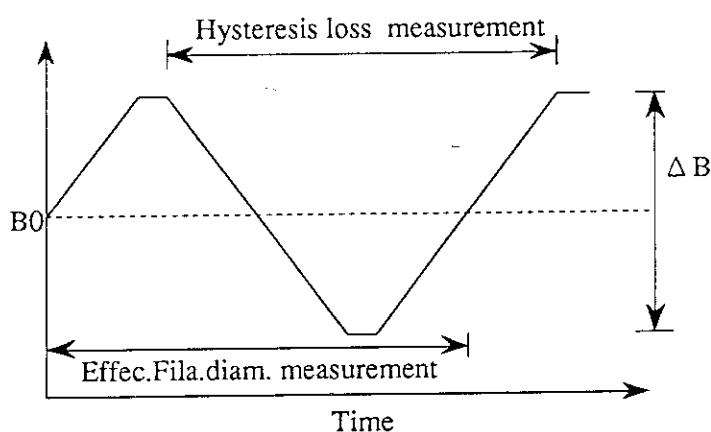
共通試験で得られた臨界電流とn値の測定結果、及びそれらの統計処理をTable 4,5、Fig.2,3に示す。(a)は(Nb,Ti)₃Sn素線、(b)は参考用のNb-Ti素線の結果である。なお、測定の繰返し数が2回の参加メーカの結果についてはその平均値を用いた。Nb-Ti素線は銅比が1.0と低いため、低磁界側で不安定性を示しやすく測定には焼損防止等で注意を要した。

試験結果より、臨界電流のばらつきは(Nb,Ti)₃Sn素線で約4~6%、Nb-Ti素線で1~4%であり、各々磁場が高い程大きくなる傾向が認められた。Nb-Ti素線のばらつきが

3. 2. 2 交流損失

交流損失の測定法は測定サンプルに外部磁界を印加し、サンプルの磁化曲線を測定することによって、その有効フィラメント径とヒステリシス損失を評価した。測定法は参加メーカによって異なり一般的な磁化法、振動試料型磁力計(VSM)、及び超電導量子干渉装置(SQUID)が用いられた。共通試験の測定条件をTable3に、参加メーカ別の測定法の詳細は付録(Table 2,3)を参照されたい。なお有効フィラメント径については磁化ヒステリシス幅 ΔB を測定・報告することで代用した。

Table 3 Measurement conditions for effective filament diameter and hysteresis loss.



Items	Effective filament diam.	Hysteresis loss
Background field(B_0)	4,5,6T	0T
Amplitude field(ΔB)	0.5,1.0 ($\pm 0.25, 0.5$ T)	6T(± 3 T)
Ramp rate (dB/dt)	<6.6mT/s	<66mT/s
Temperature	4.2K	←

4. 結果および考察

4. 1 臨界電流

1) 共通試験の結果

共通試験で得られた臨界電流とn値の測定結果、及びそれらの統計処理をTable 4,5、Fig.2,3に示す。(a)は(Nb,Ti)₃Sn素線、(b)は参考用のNb-Ti素線の結果である。なお、測定の繰返し数が2回の参加メーカの結果についてはその平均値を用いた。Nb-Ti素線は銅比が1.0と低いため、低磁界側で不安定性を示しやすく測定には焼損防止等で注意を要した。

試験結果より、臨界電流のばらつきは(Nb,Ti)₃Sn素線で約4~6%、Nb-Ti素線で1~4%であり、各々磁場が高い程大きくなる傾向が認められた。Nb-Ti素線のばらつきが

Table 4 Reported results of Ic measurement; Ic criterion 0.1 μ V/cm(a) $(Nb, Ti)_3Sn$ strand

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
9	260	265	257	241	266	267	255		258.7	8.40	0.032
10	218	224	218	202	226	224	213		217.8	7.72	0.035
11	182	187	180	167	188	187	176		181.0	7.01	0.039
12	151	155 *	150	136	155	156	144		149.5	6.74	0.045
13	124	-	124	110	130	-	116		120.8	6.99	0.058

*:Extrapolated value,Ic=162 at 11.7T

(b) Nb-Ti reference strand

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
8.0	-	196	192	195	191	196	197		194.5	2.22	0.011
8.5	152	148	145	150	151	151	153		150.0	2.51	0.017
9.0	108	106	105	106	107	107	111		107.1	1.81	0.017
9.5	67	65	65	66	67	67	72		67.1	2.17	0.032
10.0	35	32	35	32	34	34	37		34.1	1.53	0.045

Table 5 Results of n-value evaluation

(a) $(Nb, Ti)_3Sn$ strand

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
9	31	28	28	29	30	28	24		28.3	2.1	0.074
10	28	29	27	30	25	27	22		26.9	2.5	0.093
11	27	28	27	26	26	25	21		25.7	2.1	0.082
12	26	26*	25	24	22	25	19		23.9	2.4	0.100
13	25	-	23	21	23	-	17		21.8	2.7	0.124

*:Extrapolated value

(b) Nb-Ti reference strand

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
8.0	-	40	-	50	45	(34)	42		44.3	3.8	0.086
8.5	33	31	35	43	39	(31)	36		36.2	3.9	0.108
9.0	24	25	28	28	27	24	28		26.3	1.7	0.065
9.5	17	19	22	22	19	19	22		20.0	1.9	0.095
10.0	13	13	15	13	13	13	14		13.4	0.7	0.054

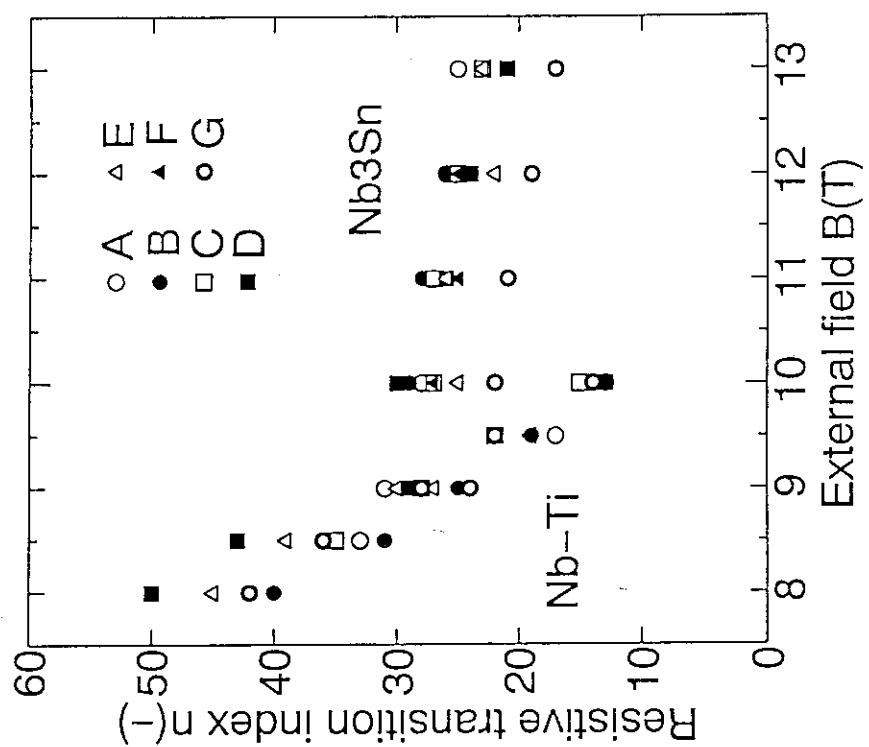


Fig.3 Results of resistive transition index evaluations.

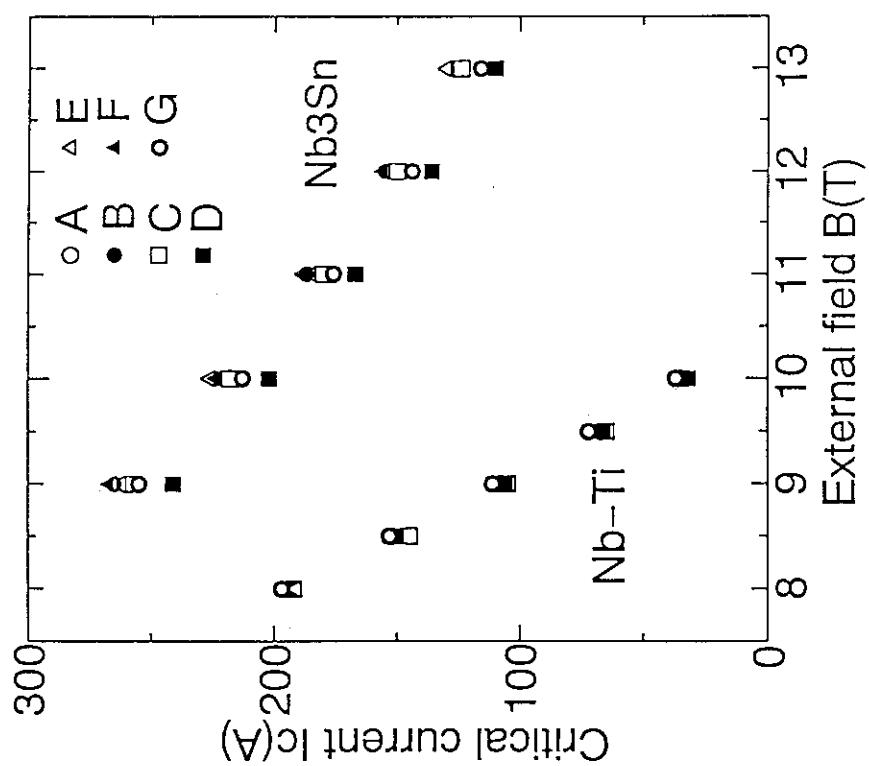


Fig.2 Results of critical current measurements; Ic criterion $0.1 \mu \text{V}/\text{cm}$

大きい主要因は測定時の歪の影響と考えられる。歪の影響を受けにくいNb-Ti素線のばらつきをVAMASの結果と比較すると、同等の電流容量付近で本試験は3.2% at 9.5T、VAMASが2.2% at 8Tとなり本試験結果の方が若干高いが、参加各メーカーの測定装置系に大きな問題はないと考えられる。

またn値のばらつきは、(Nb,Ti)₃Sn素線で7~12%、Nb-Ti素線で5~11%であり、臨界電流と比較して約2倍大きなばらつきとなった。

2) ばらつきに及ぼす測定条件の影響

(Nb,Ti)₃Sn素線の臨界電流のばらつきの主要因として上述のような測定時の測定試料の歪状態の差異[7]、及び外部磁界の精度等がある。本項ではこれら結果のばらつきの要因について検討する。

・測定治具の材質

測定時における試料のひずみ状態に差異が生じる要因として、1)測定治具の材質が異なることによる極低温での測定試料の歪状態の変化、2)試料取付け時の過度な歪負荷による損傷等がある。本共通試験では測定治具の材質としてGFRP、フェノール、セラミックスの3種類が用いられ、その積層方向も異なった。Table 6は測定治具の材質と(Nb,Ti)₃Sn素線の臨界電流の関係を示す、臨界電流には試験条件中で電磁力が最大となる磁界9Tでの結果を用いた。表中のWarpは繊維方向で熱収縮が素線に近いもの、Normalは積層方向で熱収縮が素線より大きいものを示す[6]。

Table 6 effect of mandrel materials on critical current at 9T for (Nb,Ti)₃Sn strands

Items	A	B	C	D	E	F	G
Material of mandrel (direction)	GFRP Warp	GFRP Warp	GFRP Normal	Phenol Normal	Ceramics Normal	GFRP Warp	GFRP Tube
Critical current (A)	260	265	257	241	266	267	255

表より、熱収縮率が素線内部の(Nb,Ti)₃Snより極度に大きくなるNormal方向にGFRPやPhenolを加工した場合に臨界電流が若干小さくなる傾向にあった。これはコイル状の測定試料が巻付けられている治具が過度に収縮することにより、試料が電磁力による軸方向の圧縮歪を受けやすくなり、臨界電流の歪依存性によりその値が低下したものと考えられる。しかし、熱収縮量と臨界電流との定性的な結果は見い出せなかった。

・測定サンプル上での外部磁界

ほとんどの参加メーカーにおいて、印加した外部磁界は外部磁界マグネットの中心磁界で定義されている。従ってマグネットのボア内部に配置されたコイル状の測定サンプルに印加された実磁界は外部磁界マグネットの形状等に依存して若干異なる。

マグネット中心軸上(B_0)とサンプル上(B_{sample})の磁界の相対比(B_{sample}/B_0)を調査した結果、全メーカー中の最大値でも B_{sample}/B_0 は1%以下であり、この程度の磁界の差異が臨界電流に及ぼす影響は小さく、測定結果のばらつきの1桁以下であることがわかった。

従って試料位置での外部磁界精度はばらつきの主要因ではないと考えられる。なお、外部磁界の絶対値の精度については、参加メーカが独自に評価しているもので相互に比較していないので詳細は言及できない。

3) 臨界電流定義の影響

本共通試験では、臨界電流の定義としてITER-EDA推奨法に従った電界定義 $0.1 \mu \Omega/cm$ を用いたが、原研ではこれまでに比抵抗定義 $1 \times 10^{-11} \Omega cm$ を用いてきた。本項では、これら両定義で得られる臨界電流の差異について検討する。Table 7は電界定義 $0.1 \mu \Omega/cm$ と比抵抗定義 $1 \times 10^{-11} \Omega cm$ で得られた $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線の 臨界電流とそのばらつきの比較を示す。なお臨界電流には共通試験結果の平均値を用いた。表より $0.1 \mu \Omega/cm$ 定義で得られた臨界電流は $1 \times 10^{-11} \Omega cm$ 定義と比較して約8%低く評価されることがわかる。なお測定結果のばらつきは両定義ともほぼ同等であった。

Table 7 Comparison of Critical currents obtained from different criterions.(unit:A)

Criterion	9T	10T	11T	12T	13T
$0.1 \mu \Omega/cm$	258.7(3.2)	217.8(3.5)	181.0(3.9)	149.5(4.5)	120.8(5.8)
$1 \times 10^{-11} \Omega cm$	281.4 (3.5)	235.8(3.8)	196.3(4.2)	162.1(5.2)	130.6(6.3)
$I_c(0.1)/I_c(10^{-11})$	-8.1%	-7.6%	-7.8%	-7.8%	-7.5 %

():deviation

その他、共通試験では補足的なものを加えて、電界定義の $0.1 \mu V/cm$ 、 $1.0 \mu V/cm$ 、比抵抗定義の $1 \times 10^{-11} \Omega cm$ 、 $1 \times 10^{-12} \Omega cm$ の計4種類を用いて評価した。これら4種類の定義で得られた結果の全体比較をFig.4に示す。図中の破線は比抵抗定義を線材断面積と電流値から電界定義に換算した結果を表す。これら4種類の定義から得られるn値は約25であり、共通試験結果の平均値の24と良く一致しており、結果全体に大きな問題は認められない。

4. 2 交流損失

磁化幅 ΔB 、及びヒステリシス損失の共通試験結果をTable 8に示す。表よりSQUID、及びVSM法で得られた ΔM 、ヒステリシス損失の測定結果が磁化法と比較して低くなっていることがわかる。この要因としてSQUIDやVSMの場合、装置の制約上から測定サンプル長さが十分に長くとれないことがあげられる。

Fig 5は $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線のヒステリシス損失に及ぼす試料長の影響を参加メーカB社がSQUIDで評価した結果を示す。試料形状は外部磁界コイルのボア径の関係で短尺が直状、長いものがコイル状である。図よりヒステリシス損失は試料長と共に増加し、試料長/ツイストピッチが3以上で飽和する傾向にある。従って試料長がある程度長いものを用いないと正確な損失が評価できないことがわかる。

Table 9は試料長/ツイストピッチの比が3以上の試験条件で得られた ΔM とヒステリシス損失の集計結果を示す。結果より、 $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線及びNb-Ti素線の両方において、

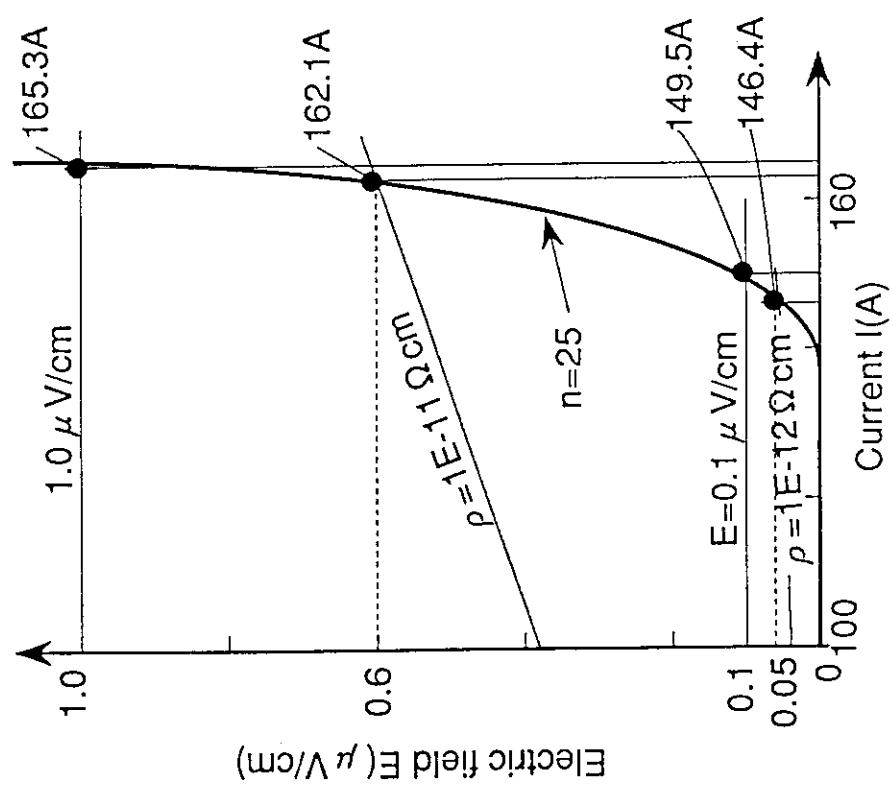


Fig.4 Critical current of $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ strand at 12T obtained by different criterions.

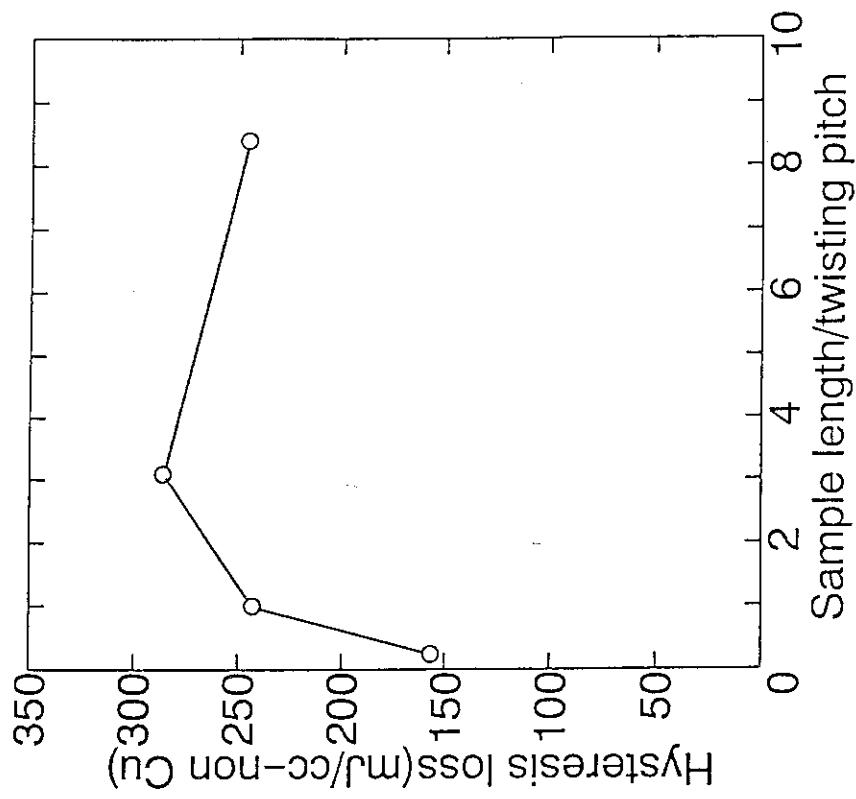


Fig.5 Effect of sample length of $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ strand on hysteresis loss .

磁化幅△B、ヒステリシス損失のばらつきは各々、約40~60%、13~16%となり、磁化幅の測定結果のばらつきが非常に大きなものとなった。

Table 8 Reported results of ΔM and hysteresis loss.(a) $(Nb, Ti)_3Sn$ strand

Items	A	B	C	D	F	G
Method	Mag.	SQUID	VSM	Mag.	Mag.	Mag.
ΔM (mT)						
$B_0=4T$ ($\Delta B=0.5T, 1.0T$)	33,37	11,10	11	19,19	21,20	6,4
=5T	32,33	7, 7	9	15,15	16,16	-
=6T	29,24	--	7	12,12	13,12	-
Hysteresis loss(mJ/cc-non Cu)						
$\Delta B=\pm 3T$	330	157	140	263	224	309

(b) Nb-Ti strand

Items	A	B	C	D	F	G
ΔM (mT)						
$B_0=4T$ ($\Delta B=0.5T, 1.0T$)	70,70	32,32	37	67,69	48,48	26,24
=5T	62,62	23,22	30	56,58	36,41	-
=6T	51,51	--	24	47,58	(30),(31)	-
Hysteresis loss (mJ/cc-non Cu)						
$\Delta B=\pm 3T$	610	425	360	892	620	786

Table 9 Average and standard deviation of AC loss measurements.

Samples	Items	Ave.	S.D.	S.D/Ave.
$(Nb, Ti)_3Sn$ strand	ΔM at $B_0=4T, \Delta B=1T$	20	11	0.55
	Hysteresis loss	282	37	0.013
Nb-Ti strand	ΔM at $B_0=4T, \Delta B=1T$	53	19	0.36
	Hysteresis loss	727	118	0.016

5. 結 論

国内超電導線材メーカーの超電導特性評価法の現状を把握すると共に、測定結果の整合性を確認するために、日立電線、古河電工、住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼の計6社の協力のもとで $(Nb, Ti)_3Sn$ 素線、及びNb-Ti素線の臨界電流、交流損失特性に関する国内共通試験を実施し、以下の結論を得た。

1. 臨界電流は治具材質(GFRP, Phenol(ベークライト)、セラミックス)が異なる条件

磁化幅 ΔB 、ヒステリシス損失のばらつきは各々、約40~60%、13~16%となり、磁化幅の測定結果のばらつきが非常に大きなものとなった。

Table 8 Reported results of ΔM and hysteresis loss.(a)(Nb, Ti)₃Sn strand

Items	A	B	C	D	F	G
Method	Mag.	SQUID	VSM	Mag.	Mag.	Mag.
ΔM (mT)						
$B_0=4T$ ($\Delta B=0.5T, 1.0T$)	33,37	11,10	11	19,19	21,20	6,4
=5T	32,33	7, 7	9	15,15	16,16	-
=6T	29,24	--	7	12,12	13,12	-
Hysteresis loss(mJ/cc-non Cu)						
$\Delta B=\pm 3T$	330	157	140	263	224	309

(b)Nb-Ti strand

Items	A	B	C	D	F	G
ΔM (mT)						
$B_0=4T$ ($\Delta B=0.5T, 1.0T$)	70,70	32,32	37	67,69	48,48	26,24
=5T	62,62	23,22	30	56,58	36,41	-
=6T	51,51	--	24	47,58	(30),(31)	-
Hysteresis loss (mJ/cc-non Cu)						
$\Delta B=\pm 3T$	610	425	360	892	620	786

Table 9 Average and standard deviation of AC loss measurements.

Samples	Items	Ave.	S.D.	S.D/Ave.
(Nb, Ti) ₃ Sn strand	ΔM at $B_0=4T, \Delta B=1T$	20	11	0.55
	Hysteresis loss	282	37	0.013
Nb-Ti strand	ΔM at $B_0=4T, \Delta B=1T$	53	19	0.36
	Hysteresis loss	727	118	0.016

5. 結論

国内超電導線材メーカーの超電導特性評価法の現状を把握すると共に、測定結果の整合性を確認するために、日立電線、古河電工、住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼の計6社の協力のもとで(Nb,Ti)₃Sn素線、及びNb-Ti素線の臨界電流、交流損失特性に関する国内共通試験を実施し、以下の結論を得た。

1. 臨界電流は治具材質(GFRP, Phenol(バークリート)、セラミックス)が異なる条件

下で測定され、その結果のばらつきは $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線が4.5% at 12T、Nb-Ti素線が1.7% at 9T、n値のばらつきは $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線が10.0% at 12T、Nb-Ti素線が6.5% at 9Tであった。

2. 交流損失は一般的な磁化法、SQUID,VSMの3種類の装置で測定され、試料長が素線のツイスツピッチの約3倍以上のものを用いないと測定値が小さく評価される。この条件下で測定された結果のばらつきは、 $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線及びNb-Ti素線において、磁化幅 ΔB が35~55%、ヒステリシス損失が13~16%であり、磁化幅のばらつきが非常に大きくなつた。

3. 本共通試験の実施により、ITER-EDAに関連する国内超電導線材メーカーの臨界電流、及び交流損失測定に関する現状・概略が把握できた。またITER-EDAの測定法をほぼ準拠することで、臨界電流は約5%、ヒステリシス損失は約15%のばらつきで各機関とも評価できることが明らかとなつた。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂きました核融合工学部 島本部長、ならびに実験に御協力頂きました超電導磁石研究室の諸氏に感謝に意を表します。また共通試験の超電導素線をご提供、特性評価に御協力頂きました日立電線、古河電工、ならびに共通試験に御協力頂きました住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼の各社に感謝に意を表します。

参 考 文 献

- [1]M.Huguet,The ITER magnet system - present status of design and P&D programme,15th IEEE/NPSS symposium on fusion engineering,Vol.1,1993,pp.1-6.
- [2] T.Isono et al., Development of a $(Nb,Ti)_3Sn$ strand for the ITER CS scalable model coil, IEEE Trans. on Applied superconductivity ASC'92, Vol 3, No.1, March 1993,pp.496-499.
- [3]T.Ando et al., Development of Nb_3Al cable-in-conduit fusion superconductors,IEEE Trans. on Applied superconductivity ASC'92, Vol 3, No.1, March 1993,pp.492-495.
- [4]太刀川恭治、VAMAS・超電導・低温構造部会の活動、低温工学Vol.27,No.6、1992、PP..447-452.
- [5] 小川陸郎、超電導技術の標準化に向けて、第51回1994年度春期低温工学・超電導学会 講演予稿集、低温工学協会、1994、pp.170-171.
- [7]A.Clark et.al., IEEE trans. Mag.,MAG-17,(1981),p.2316.

下で測定され、その結果のばらつきは $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線が4.5% at 12T、Nb-Ti素線が1.7% at 9T、n値のばらつきは $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線が10.0% at 12T、Nb-Ti素線が6.5% at 9Tであった。

2. 交流損失は一般的な磁化法、SQUID,VSMの3種類の装置で測定され、試料長が素線のツイスツピッチの約3倍以上のものを用いないと測定値が小さく評価される。この条件下で測定された結果のばらつきは、 $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線及びNb-Ti素線において、磁化幅 ΔB が35~55%、ヒステリシス損失が13~16%であり、磁化幅のばらつきが非常に大きくなつた。

3. 本共通試験の実施により、ITER-EDAに関する国内超電導線材メーカーの臨界電流、及び交流損失測定に関する現状・概略が把握できた。またITER-EDAの測定法をほぼ準拠することで、臨界電流は約5%、ヒステリシス損失は約15%のばらつきで各機関とも評価できることが明らかとなつた。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂きました核融合工学部 島本部長、ならびに実験に御協力頂きました超電導磁石研究室の諸氏に感謝に意を表します。また共通試験の超電導素線をご提供、特性評価に御協力頂きました日立電線、古河電工、ならびに共通試験に御協力頂きました住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼の各社に感謝に意を表します。

参 考 文 献

- [1]M.Huguet,The ITER magnet system - present status of design and P&D programme,15th IEEE/NPSS symposium on fusion engineering,Vol.1,1993,pp.1-6.
- [2] T.Isono et al., Development of a $(Nb,Ti)_3Sn$ strand for the ITER CS scalable model coil, IEEE Trans. on Applied superconductivity ASC'92, Vol 3, No.1, March 1993,pp.496-499.
- [3] T.Ando et al., Development of Nb_3Al cable-in-conduit fusion superconductors,IEEE Trans. on Applied superconductivity ASC'92, Vol 3, No.1, March 1993,pp.492-495.
- [4] 太刀川恭治、VAMAS・超電導・低温構造部会の活動、低温工学Vol.27,No.6、1992、PP.447-452.
- [5] 小川陸郎、超電導技術の標準化に向けて、第51回1994年度春期低温工学・超電導学会 講演予稿集、低温工学協会、1994、pp.170-171.
- [7] A.Clark et.al., IEEE trans. Mag.,MAG-17,(1981),p.2316.

下で測定され、その結果のばらつきは $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線が4.5% at 12T、Nb-Ti素線が1.7% at 9T、n値のばらつきは $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線が10.0% at 12T、Nb-Ti素線が6.5% at 9Tであった。

2. 交流損失は一般的な磁化法、SQUID,VSMの3種類の装置で測定され、試料長が素線のツイスツピッチの約3倍以上のものを用いないと測定値が小さく評価される。この条件下で測定された結果のばらつきは、 $(Nb,Ti)_3Sn$ 素線及びNb-Ti素線において、磁化幅 ΔB が35~55%、ヒステリシス損失が13~16%であり、磁化幅のばらつきが非常に大きくなつた。

3. 本共通試験の実施により、ITER-EDAに関する国内超電導線材メーカーの臨界電流、及び交流損失測定に関する現状・概略が把握できた。またITER-EDAの測定法をほぼ準拠することで、臨界電流は約5%、ヒステリシス損失は約15%のばらつきで各機関とも評価できることが明らかとなつた。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂きました核融合工学部 島本部長、ならびに実験に御協力頂きました超電導磁石研究室の諸氏に感謝に意を表します。また共通試験の超電導素線をご提供、特性評価に御協力頂きました日立電線、古河電工、ならびに共通試験に御協力頂きました住友電工、昭和電線、三菱電機、神戸製鋼の各社に感謝に意を表します。

参 考 文 献

- [1]M.Huguet,The ITER magnet system - present status of design and P&D programme,15th IEEE/NPSS symposium on fusion engineering,Vol.1,1993,pp.1-6.
- [2] T.Isono et al., Development of a $(Nb,Ti)_3Sn$ strand for the ITER CS scalable model coil, IEEE Trans. on Applied superconductivity ASC'92, Vol 3, No.1, March 1993,pp.496-499.
- [3]T.Ando et al., Development of Nb_3Al cable-in-conduit fusion superconductors,IEEE Trans. on Applied superconductivity ASC'92, Vol 3, No.1, March 1993,pp.492-495.
- [4]太刀川恭治、VAMAS・超電導・低温構造部会の活動、低温工学Vol.27,No.6、1992、PP..447-452.
- [5] 小川陸郎、超電導技術の標準化に向けて、第51回1994年度春期低温工学・超電導学会 講演予稿集、低温工学協会、1994、pp.170-171.
- [7]A.Clark et.al., IEEE trans. Mag.,MAG-17,(1981),p.2316.

付 錄

1. 共通試験の装置、治具に関する詳細

参加メーカー別の装置、治具の詳細一覧をTable 1に示す。

1) 臨界電流

Table 1 Sample and external magnet configurations for Ic measurement

Items	A	B	C	D	E	F	G
[Sample]							
Diameter(Φ mm)	25	25	26	45	27	35	33
Pitch(mm)	3	3	5	6	4	6.5	3
No. of turns	7	12	6.5	5	7	4	4
Groove	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes
Total length(mm)	600	1000	555	700	600	450	400
Voltage tap length(mm)	150	240	200	290	90	220	100
Meterial of mendrel (direction)	GFRP Warp	GFRP Warp	GFRP Normal	Phenol Normal	Ceramic -	GFRP Warp	GFRP Warp
[Magnet]							
Max.Field(T)	13.0	11.7	14.0	15.0	15.5	12.0	13.5
Bore diam.(Φ mm)	70	150	50	50	33	51	52
Outer diam.(Φ mm)	—	315	360	200	276	230	240
Axial Length(mm)	—	377	360	340	295	240	320

2) 交流損失

Table 2 Sample configuration for AC loss measurement

Items	A	B	C	D	F	G
Method	Mag.	SQUID	VSM	Mag.	Mag.	Mag.
Confiruration	Coil	Straight	Straight	Coil	Coil	Coil
Length (mm)		5~42	2			
Diameter(Φ mm)	20	-	-	14.0	31.3	34
Pitch(mm)	1.5	-	-	1.4	1.3	2
Groove	No	-	-	No	No	Yes
No. of turns	44	-	-	14	62	28
Meterial of mendrel	Phenol	-	-	Phenol	Phenol	Ceramics

Table 3 External magnet and detective conditions for AC loss measurement

Items	A	B	C	D	F	G
[Magnet]						
Max.Field(T)	8.0		9.0	6.0	6.2	5.0
Bore diam.(Φ mm)	35		25.4	30	55	82
Outer diam.(Φ mm)	127		121	80	114	190
Length(mm)	150		152	160	295	230
[Pick up Coil]						
Winding diam.	29.5			20	39	39
No. of turns	-			800	1000	2000
Wire diam.	0.1			0.1	0.05	0.05
Axial length	10			20	10	20
[Cancel Coil]						
Winding diam.	15.7			10	39	29.2
No. of turns	-			3000	1500	4000
Wire diam.	0.1			0.1	0.05	0.05
Axial length	10			20	15	20

2. その他の共通試験結果

本研究で実施した共通試験において、臨界電流の決定法として電界定義の $0.1\mu V/cm$ 、 $1.0\mu V/cm$ 、比抵抗定義の $1 \times 10^{-11}\Omega cm$ 、 $1 \times 10^{-12}\Omega cm$ の計4種類を用いた。本文中では、ITER-EDA推奨法に対応させて電界定義の $0.1\mu V/cm$ のみの結果を報告したが、他の3定義による評価結果を以下にまとめて示す。

Table 4 Results of Ic measurement for $(Nb, Ti)_3Sn$ strand(a) Ic criterion $1.0\mu V/cm$

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G	Ave.	S.D.	S.D./Ave
9	280	289	279	261	290	289	281	281.3	10.1	0.036
10	237	242	236	218	246	244	236	237.0	8.6	0.036
11	198	203	197	182	206	205	196	198.1	7.5	0.038
12	165	170	165	150	173	171	163	165.3	7.1	0.043
13	136	-	137	123	143	-	133	134.4	6.6	0.049

*:Extrapolated value, $I_c=178$ at $11.7T$

(b) Ic criterion $1 \times 10^{-12}\Omega cm$

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G	Ave.	S.D.	S.D./Ave
9	259	265	256	241	266	266	255	258.3	8.3	0.032
10	215	223	215	200	224	221	213	215.9	7.6	0.035
11	178	184	177	164	185	185	174	178.1	7.0	0.039

12	147	152*	146	133	150	154	143	146.4	6.5	0.044
13	118	-	120	106	124	-	110	115.6	6.6	0.057

*:Extrapolated value,Ic=160 at 11.7T

(c) Ic criterion $1 \times 10^{-11} \Omega \text{ cm}$

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
9	280	289	279	260	290	290	282	281.4	9.8	0.035	
10	235	242	234	217	246	243	234	235.8	8.9	0.038	
11	196	201	195	179	206	203	194	196.3	8.2	0.042	
12	163	167*	161	145	173	168	158	162.1	8.4	0.052	
13	132		133	118	143		127	130.6	8.2	0.063	

*:Extrapolated value,Ic=175 at 11.7T

Table 5 Results of Ic measurement for Nb-Ti strand

(a) Ic criterion $1.0 \mu \text{V/cm}$

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
8.0	-	208	-	205	200	-	208	205.3	3.3	0.016	
8.5	163	160	150	159	157	-	163	158.7	4.4	0.028	
9.0	119	116	113	115	108	118	120	115.6	3.8	0.033	
9.5	77	73	72	74	73	76	80	75.0	2.6	0.035	
10.0	42	39	41	39	37	41	44	40.4	2.1	0.052	

(b) Ic criterion $1 \times 10^{-12} \Omega \text{ cm}$

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
8.0	-	197	192	195	189	197	197	194.5	3.0	0.015	
8.5	151	148	144	149	146	150	153	148.7	2.8	0.019	
9.0	105	102	102	103	95	105	109	103.0	4.0	0.039	
9.5	65	62	62	63	60	64	69	63.6	2.7	0.042	
10.0	33	29	31	29	26	29	34	30.1	2.5	0.083	

(c) Ic criterion $1 \times 10^{-11} \Omega \text{ cm}$

Field(T)	A	B	C	D	E	F	G		Ave.	S.D.	S.D./Ave
8.0	-	208	-	205	200	211	208	206.4	3.7	0.018	
8.5	162	159	150	159	157	160	163	158.6	4.0	0.025	
9.0	117	114	111	112	107	116	119	113.7	3.8	0.033	
9.5	74	70	69	71	70	73	77	72.0	2.6	0.036	
10.0	37	34	37	34	33	36	40	35.9	2.2	0.061	