イットリウム系高温超電導薄膜を用いた 1 kA 級限流ユニットの開発

正員 下畑 賢司* 正員 横山 彰一*
非会員 小寺 溢男* 正員 安田 健次**

Development of kA Class Fault Current Limiting Unit with YBCO Thin Films

Kenji Shimohata*, Member, Syoichi Yokoyama*, Member, Itsuo Kodera*, Non-member, Kenji Yasuda**, Member

A kA-class fault current limiting unit (FCL unit) with YBCO thin films has been developed. The size of the YBCO film on a sapphire substrate with a metal shunt layer is 3 cm in width and 10 cm in length. The kA class unit consists of eight films in parallel. A polygonal arrangement of the YBCO films selected to keep the current distribution uniform. Moreover, the return pass of the current is set at the center axis of the unit. The model, connected to two units in series, was tested for normal operation and current limitation. The model carried 1 kA for 1 hour and 1.2 kA for 5 min without quench at normal operation, and the current distribution between the films was uniform. The short circuit tests were performed against a power line that has a prospective fault current of 8.9 kA. A total of eight tests were successfully carried out at 200 V, 3.5 cycles, and the model limited the fault current to 1.2 kA.

キーワード：限流器，超電導膜，クエンチ，並列接続

Keywords: fault current limiter, superconducting film, quench, parallel connection

1. 前書き

我が国が、地球環境保全という制約のもとで今後とも安定的に発展するにはエネルギーの電力化は不可欠とされ、電力の有効利用技術の確立は重要である。超電導限流器は、短絡電流を瞬時に抑制できることから、短絡電流の増加による遮断器リプレースのみならず、従来困難であった系統連係への適用、超電導ケーブルの保護用など電力系統への導入効果が検討されている^{(1)~(3)}。超電導限流器としては、整流器型^{(4)~(6)}、磁気遮蔽型⁽⁷⁾、抵抗型^{(8)~(10)}など様々な方式の開発が進んでいる。この中で、薄膜限流素子の容量は現状では小さいものの、過電流に対して瞬時に応答するなど動作特性が優れており、コンパクトな電力用限流器の実現可能性を有している。また、限流素子には、事故時に限流器として動作するのみならず、定常時に定格電流を安定して通電できることが要求される。

我々は、超電導発電関連機器・材料技術研究組合が、新

エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から受託した研究を平成12年度から5年計画で分担し、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」「限流素子基盤技術の研究開発」のうち、Y系超電導膜のSN転移（クエンチ）を利用した抵抗型限流素子（FCL）において、大電流化の基盤技術の研究開発を実施しており、大電流化の電流容量目標は1 kAである。現状の超電導膜を用いた限流素子の電流容量は、1枚あたり数十Aから数百Aであるが、電力機器に適用可能な限流素子には、kA級の電流容量が要求される。このため、1枚の限流素子の特性を最大限発揮させるとともに、限流素子を並列に接続して大容量化する必要がある。

これらの基盤技術を開発するために、シミュレーションによる限流素子設計⁽¹¹⁾、超電導膜内の電流分布の検討⁽¹²⁾、1枚の限流素子での限流特性⁽¹³⁾、および限流素子を並列接続した限流ユニット⁽¹⁴⁾の研究を進めてきた。

本報では、Y系超電導膜を並列に接続した1 kA級の電流容量を有する限流素子の限流特性および連続通電特性を報告する。

2. 1 kA 限流ユニットの仕様

表1に、限流ユニットの仕様を示す。主に、電流戻りリード部の異なる2種類の限流ユニットを試作・評価した。さらに、限流ユニット-2を2個直列に接続したモデルについても検討を行った。Y系超電導膜のサイズは、いずれも、幅

* 三菱電機（株）先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Advanced technology R&D center, Mitsubishi Electric Corp.
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

** Super-GM
〒530-0047 大阪市北区西天満 5-14-10 梅田 UN ビル
Super-GM
Umeda UN BLDG., 5-14-10, Nishitenma, Kita-ku, Osaka 530-0047

表 1 1 kA 限流ユニットの仕様

Table 1. Specifications of the 1 kA fault current limiting unit.

FCL Unit	Unit-1	Unit-2	2 series connected unit-2
Schematic drawing	Fig. 1 (i)	Fig. 1. (ii)	Fig. 1 (ii)
Picture	Fig. 2 (a)	Fig. 2 (b)	Fig. 2 (c)
Return pass	Outside of unit	Center of unit	Center of unit
Number of series	1	1	2
Current	1 kArms	1 kArms	1 kArms
Voltage	120 Vrms	100 Vrms	200 Vrms
Number of parallel of YBCO film	8	8	8
Resistance at room temperature	0.109 Ω	0.063 Ω	0.127 Ω
Resistance at 90 K	0.047 Ω	0.023 Ω	0.047 Ω
YBCO film			
Length	10 cm	10 cm	10 cm
Width	3 cm	3 cm	3 cm
Material of substrate	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Thickness of substrate	1 mm	1 mm	1 mm
Thickness of YBCO	300 nm	300 nm	300 nm
I _c	205 A ~ 220 A	288 A ~ 306 A	288 A ~ 306 A
Thickness of gold	100 nm	150 nm	150 nm

3 cm, 長さ 10 cm とし, サファイア基板の厚みは 1 mm とした。限流ユニットの抵抗を調整するために, YBCO 表面に金の保護膜を設けており, この厚みは, 限流ユニット-1 で 100 nm, 限流ユニット-2 で 150 nm とした。金保護膜は, 限流抵抗の調整以外にも, 大気中の水分との反応防止や, 電極部での接続抵抗低減の役割を果たしている。超電導膜両端に長さ 1 cm の電流端子部を設けたため, 限流素子としての有効長は 8 cm である。超電導膜の臨界電流 (I_c) を 210 A ± 20% とし, 交流ピーク電流を最低の I_c に一致させると, 1 枚の超電導膜の電流容量は交流実効値 120 A となる。この超電導膜を, 8 枚並列に接続することにより, 電流容量 1 kA 級の限流ユニットとなる。超電導膜単独で電界

図 1 1 kA ユニットの配置模式図

Fig. 1. Schematic drawings of 1 kA units.

図 2 1 kA 限流ユニットの写真

Fig. 2. Pictures of 1 kA FCL units.

基準 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ で I_c を評価した結果、限流ユニット-1 では 205 A から 220 A、限流ユニット-2 では 288 A から 306 A と仕様を満足した。

図 1 に、限流ユニットの模式図、図 2 に写真を示す。限流ユニットは、8 枚の超電導膜を多角形状に配置し、銅端子部で並列接続した。限流ユニット-1 では、電流の戻りリードを多角形外部に約 10 cm 離して設置し、戻り電流リードに近い側の超電導膜から 1~5 と番号を付けた。各超電導膜の電圧を 2 分割して測定するため、超電導膜中央部と両端に電圧タップを設けた。限流ユニット-2 では、電流戻りリードを多角形の中心に配置した。いずれのユニットでも、超電導膜から銅端子間の配線は、接続抵抗および配線抵抗を低減するため Bi 系銀シース線材を用い、各超電導膜の電流を測定するためのピックアップコイルを Bi 系銀シース

線材部に設置した。

3. 試験方法

1 kA 限流ユニットの評価としては、一定の交流電流を長時間通電する連続通電試験、および短絡電流を数サイクル間供給して限流動作を確認する限流試験を実施した。図 3 に、1 kA 限流ユニットの試験回路を示す。

連続通電用の電源は、定電圧駆動のアンプからトランスを介して 1 kA 限流ユニットに電流を供給する方式であり、電源容量は 1.5 kA, 8 V である。

限流試験は、電力会社の 3 kV 系統から受電し、トランス 1 を用いて 300 V に電圧を低下させ、さらに電圧切り替えタップ付きのトランス 2 により電圧を調整して 1 kA 限流ユニットに短絡電流を供給した。短絡電流供給前は、電流ゼロの状態である。短絡電流の投入および遮断は 3 kV 側の遮断器で時間を調整し、限流動作の継続時間は最長 4 サイクル、短絡時の電圧位相は 0° とした。限流ユニットは、液体窒素中に設置し、ガラスエポキシ製の低温容器は大気開放とした。

4. 限流ユニットの試験結果および考察

4.1 連続通電試験結果 限流ユニットにおいて、1 kA が連続通電可能であることを検証した。図 4 に、限流ユニット-1 における連続通電試験結果を示す。(a) は電流と抵抗性電圧であり、抵抗性電圧は、測定した電圧から誘導性の電圧を差し引いて求めた。(b) は各超電導膜の電流分布であり、戻りリードに近い側から 1, 2...とし、対称性を考慮して半分の領域を示した。連続通電時の抵抗性電圧は、1 mV 以下で安定しており、1 kA で 1 時間の連続通電が可能であった。しかし、この際の電流分布は、戻りリードに近い超電導膜 1 の電流変化が大きく、戻りリードから遠い超電導膜 5 の電流変化が小さい結果となり、大きな偏流が発生していることがわかる。

図 3 1 kA 限流ユニットの試験回路の模式図

Fig.3. Schematic drawings of test circuit at normal operation and current limitation for 1 kA FCL unit.

図 4 限流ユニット-1 での 1 kA 通電時の電流と抵抗性電圧、および電流分布測定結果
((b) 図の 1 から 5 は各超電導膜の電流分布で、1 が電流戻りリード側)

Fig.4. Measured result of current, resistive voltage and current distribution between the films at 1 kA for unit-1 (No.1 film is nearest of the return pass in Fig.4(b)).

図5 限流ユニット-2での1kA通電時の電流と抵抗性電圧の測定結果および電流分布測定結果
Fig. 5. Measured current and resistive voltage of the unit-2 and current distribution between the films at 1 kA.

図5に、電流戻りリードを多角形の中心に配置した限流ユニット-2での1kA連続通電試験結果を示す。(a)は電流と抵抗性電圧、(b)は各超電導膜の電流である。連続通電時の抵抗性電圧は、1mV以下で安定していた。また、各超電導膜の電流ばらつきは $\pm 10\%$ と、ほぼ均一であった。

4.2 電流分布の考察 これらから、限流ユニット-1で発生した電流偏流は、電流戻りリード部に流れる電流が、限流ユニット-1の超電導膜の電流分布に影響したと考えられる。このため、限流ユニット-1において、8角形配置した超電導膜と電流戻りリード部を考慮した電流分布を計算した。この電流分布の計算⁽¹²⁾においては、超電導膜の自己インダクタンス $L(H)$ 、超電導膜間の相互インダクタンス $M(H)$ および超電導膜と電流戻りリード間の相互インダクタンス $M_r(H)$ の値が必要であり、次の値を用いた。ここで、隣り合う超電導膜間の相互インダクタンスを M_1 、多角形の反対側の超電導膜との相互インダクタンスを M_4 等とした。また、超電導膜と戻り電流リードの間の相互インダクタンスについては、 M_{R1} を電流戻りリードに近い超電導膜との相互インダクタンス、 M_{R5} を電流戻りリードから遠い超電導膜との相互インダクタンス、等とした。

$$L = 9.2 \times 10^{-8}$$

$$M_1 = 5.2 \times 10^{-8}, M_2 = 3.3 \times 10^{-8}, M_3 = 2.4 \times 10^{-8},$$

$$M_4 = 1.9 \times 10^{-8}$$

$$M_{R1} = -1.5 \times 10^{-8}, M_{R2} = -1.4 \times 10^{-8}, M_{R3} = -1.1 \times 10^{-8},$$

$$M_{R4} = -0.8 \times 10^{-8}, M_{R5} = -0.7 \times 10^{-8}$$

図6に、限流ユニット-1での1kA連続通電時の電流分布計算結果を示す。戻りリードに近い超電導膜1の電流変化が大きく、戻りリードから遠い超電導膜5の電流変化が小さい結果となり、試験結果と一致した。

これから、限流ユニット-1で生じた電流偏流は、電流戻りリード部に流れる電流の影響であることが確認できた。さらに、電流戻りリードを多角形の中心に配置することで、各超電導膜の電流分布を均一にできることがわかった。

図6 限流ユニット-1での1kA通電時の超電導膜の電流分布計算結果（電流1が電流戻りリード側）
Fig. 6. Calculated current distribution between the films at 1 kA for FCL unit-1 (No.1 film is nearest of the return pass).

4.3 限流試験結果 1kA限流ユニットにおいて、限流試験を実施した。戻り電流リードを多角形の中心に配置した限流ユニット-2での限流試験結果は、次章で示す2直列接続時の試験結果で報告し、ここでは省略した。図7(a)に、限流ユニット-1の120Vでの限流試験結果を示す。短絡電流供給後、4.0kAで限流動作を開始し、限流動作開始時に最大260Vの電圧が発生した。この電圧は試験電圧の1.5倍程度であり、問題ないレベルである。また、限流動作時の1kA限流ユニット-1両端の電圧実効値は115Vであり、印加電圧のほぼ全てが限流ユニット-1に印加されている。限流動作中の電流は、限流ユニット-1の温度上昇による抵抗増大のため徐々に減少し、4サイクル時の交流実効値は840Aまで限流した。この回路で、限流ユニットが無い場合の短絡電流推定値は8kAであり、限流ユニット-1により短絡電流を1/10に低減できた。この時、電流と電圧から限流ユニット-1の抵抗を算出し、抵抗の温度依存性から計算した最高温度は350Kであった。

(a) Measured current and voltage

(b) Measured voltage of the films at start of current limitation.

図7 限流ユニット-1の120 Vでの限流試験結果

Fig. 7. Test result of current limitation for FCL unit-1 at 120 V.

図7(b)に、1 kA 限流ユニットの限流動作開始時の電流、および各超電導膜の電圧分布を示す。電圧は、8枚の超電導膜をV1からV8とし、各超電導膜を2分割してVa、Vbとして示した。各超電導膜を2分割した電圧は、ほぼ同時に発生し、かつ発生電圧が均一なため、それぞれ重なっている。これから、8並列接続した全ての超電導膜の全長にわたって、ほぼ均一にクエンチしたことがわかる。連続通電時には、超電導膜間に偏流が発生していたが、限流動作を開始する I_c の2倍程度の電流では電流分布は均一となるため、8並列接続した全ての超電導膜が同時にクエンチしたと考えられる⁽¹⁴⁾。

5. 2直列接続した限流ユニット-2の試験結果および考察

5・1 連続通電試験結果 限流ユニットの連続通電試験において、電流戻りリードを多角形の中心に配置することで電流の均一化が図れた限流ユニット-2を2個直列に接続して連続通電試験を実施した。図8に、2直列接続した限流ユニット-2での連続通電試験結果を示す。1 kAを60分間連続通電後、1.2 kAで5分間通電した。クエンチの発生や液体窒素の異常蒸発などは見られず安定して通電可能であった。

図9に、2直列接続した限流ユニット-2の、1 kA 連続通電時の電流と電圧測定結果および分布測定結果を示す。2個のユニットをそれぞれa、bとし、Vr-a、Vr-bは各限流ユニットでの抵抗性電圧、a1からa5はaユニットでの超電導膜の電流であり、bユニットに近い側から1とし、対称性を考慮して半分の領域を示した。抵抗性電圧は1 mV以下で安定しており、各超電導膜の電流均一度は $\pm 10\%$ とほぼ均一であった。これから、限流ユニット-2では、電流戻りリードを多角形の中心に配置した効果により、ユニット外部に漏れる磁界が小さいため、複数のユニットを配置した場合でも他のユニットの配置の影響を受けないと考えられる。

図8 2直列接続した限流ユニット-2の連続通電時の電流測定結果

Fig. 8. Test result for normal operation of the 2 series connected FCL unit-2.

5・2 限流試験結果 2直列接続した限流ユニット-2において、200 Vで3.5サイクルの限流試験を実施した。図10に、限流試験結果を示す。Vallは2直列接続した限流ユニット-2の電圧、Va、Vbは各限流ユニットの電圧であり、Va、Vbは重なっている。電流が5.22 kAで限流動作を開始し、3サイクル時の電流ピークは1.67 kAまで限流した。2個の限流ユニット-2の電圧は、ほぼ同時に発生し、限流動作時の分担電圧も等しいため、均一にクエンチしたと考えられる。

5・3 限流試験結果の考察 図11に、限流ユニット設置による短絡電流抑制効果を明らかにするため、限流試験での電流測定結果を限流ユニットが無い場合の短絡電流の計算結果と比較して示す。限流ユニットが無い場合、第1波の最大電流は22 kA、3.5サイクル時の交流電流実効値は8.9 kAである。限流ユニットの設置により、第1波の最大電流を5.2 kA、3.5サイクル時の交流電流実効値を1.2 kAに限流した。これから、限流ユニットが無い場合に比べ、限

(a) Current and resistive voltage

(b) Current distribution between films

図9 2直列接続した限流ユニット-2の1kA連続通電時の電流と電圧測定結果および分布測定結果

Fig. 9. Test results of normal operation at 1 kA for 2 series connected FCL unit-2.

図10 2直列接続した限流ユニット-2の200V, 3.5サイクルでの限流試験結果

Fig. 10. Current limiting test result at 200 V, 3.5 cycles for 2 series connected FCL unit-2.

図12 2直列接続した限流ユニット-2の限流試験での温度算出結果と、限流シミュレーションの比較

Fig. 12. Experimental result and calculated result of current and temperature at current limiting test for 2 series connected FCL unit-2.

図11 2直列接続した限流ユニット-2の限流器の有無での短絡電流比較（限流器ありは試験，限流器なしは計算）

Fig. 11. Limited current with 2 series connected FCL unit-2 compared with a fault current without FCL (without FCL: calculation, with FCL: experiment).

図13 2直列接続した限流ユニット-2の200V, 3.5サイクルでの限流試験時の限流動作開始電流

Fig. 13. Normal transition current at current limiting test of 2 series connected FCL unit-2 at 200 V, 3.5 cycles.

流ユニットは短絡電流実効値を約 1/7 に抑制しており、大幅な限流効果が確認できた。

この限流試験での超電導膜の温度を、抵抗の温度依存性から見積もった結果、400 K 程度まで温度が上昇していることがわかった(図 12)。なお、温度計算結果で電流がほぼゼロの場合の温度に特異点が見られるが、これは電流と電圧から抵抗を算出する際のエラーであり、無視できる。同図に、限流動作時の電流と超電導膜温度の計算結果も示した。限流動作中の電流および温度上昇計算結果は、試験結果と良く一致し、試験結果を再現できることがわかった。

さらに、限流ユニットにダメージがないことを確認するため、この限流試験を 8 回実施した。図 13 に、限流動作開始時の電流推移を示す。8 回の限流動作において、限流動作開始電流は 5.2 kA と一定であり、限流ユニットに I_c 劣化などのダメージが無いことを確認した。

6. む す び

幅 3 cm の 8 枚の超電導膜を多角形に配置した限流ユニットで、1 kA を安定して連続通電可能なことが確認できた。この場合、電流戻りリードを多角形の中心に配置することで、各超電導膜の電流分布を均一にできることが分かった。また、電流戻りリードを多角形の中心に配置し、2 直列接続した限流ユニットにおいて、200 V で 3.5 サイクルの限流動作が安定して可能であることが検証できた。

本研究は、経済産業省産業技術環境局のプロジェクト「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託により実施したものである。

(平成 17 年 1 月 14 日受付, 平成 17 年 5 月 2 日再受付)

文 献

- (1) Y. Hashimoto, S. Ito, T. Hasegawa, and Y. Mino: "Feasibility of application of superconductivity to power system", *T. IEE Japan*, Vol.111-B, No.4, pp.344-351 (1991-4) (in Japanese)
橋本安雄・伊藤俊一・長谷川泰三・美濃由明:「超電導技術の電力システムへの適用可能性」, 電学論 B, **111**, 4, pp.344-351 (1991-4)
- (2) S. Sugimoto, J. Kida, H. Arita, C. Fukui, T. Yamagiwa, and Y. Murai: "Fault current limiting system for 500 kV power systems", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.10, pp.1403-1410 (1997-10) (in Japanese)
杉本重幸・木田順三・有田 浩・福井千尋・山極時生・村井由宏:「500 kV 系統における短絡容量抑制システム」, 電学論 B, **117**, 10, pp.1403-1410 (1997-10)
- (3) Y.H. Guo, Y. Yosomizu, T. Matsumura, and H. Fujita: "Difference of effect of superconducting fault current limiter introduced into electric power system due to resistive-type, reactive-type and their introduction location", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.6, pp.791-800 (2000-6) (in Japanese)
郭 育紅・横水康伸・松村年郎・藤田秀紀:「電力系統における超伝導限流器導入効果の抵抗型とリアクトル型および設置位置による相違」, 電学論 B, **120**, 6, pp.791-800 (2000-6)
- (4) T. Ohkuma, S. Honjyo, N. Kobayashi, Y. Iwata, N. Tokuda, Y. Matubara, and M. Asano: "Evaluation of fault current limiter with a rectifier for 500 kV power system", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.4, pp.474-481 (1999-4) (in Japanese)
大熊 武・本庄昇一・小林直樹・岩田良浩・徳田憲昭・松原克夫・浅野正邦:「整流型限流器の 500 kV 系統への適用検討」, 電学論 B, **119**, 4, pp.474-481 (1999-4)
- (5) T. Ohkuma, Y. Sato, Y. Iwata, N. Tokuda, Y. Matubara, and M. Asano:

"Operating tests with a 6.6 kV-reduction model of rectifying-type fault current limiter system", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.6, pp.858-863 (2000-6) (in Japanese)

大熊 武・佐藤礼文・岩田良浩・徳田憲昭・松原克夫・浅野正邦:「整流型限流器小型モデル(6.6 kV 級)の動作検証」, 電学論 B, **120**, 6, pp.858-863 (2000-6)

- (6) E.M. Leung, A. Rodriguez, G.W. Albert, B. Burley, M. Dew, P. Gurrola, D. Madura, G. Miyata, K. Muehleman, L. Nguyen, S. Pidcoe, S. Ahmed, G. Dishaw, C. Nieto, I. Kersenbaum, B. Gamble, C. Russo, H. Boenig, D. Peterson, L. Motowild, and P. Haldar: "High temperature superconducting fault current limiter development", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol.7, No.2, p.985 (1997)
- (7) H. Kado and M. Ichikawa: "Performance of a high-Tc superconducting fault current limiter—design of a 6.6 kV magnetic shielding type superconducting fault current limiter—", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol.7, No.2, p.993 (1997)
- (8) B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, and H.W. Neumueller: "Resistive fault current limiters with YBCO films—100 kVA functional model", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol.9, No.2, p.655 (1999)
- (9) J. Noudem, J.M. Barbut, O. Belmont, J. Sanchez, P. Tixador, and R. Tounier: "Current limitation at 1080 A under 1100 V with Bulk Bi2223", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol.9, No.2, p.664 (1999)
- (10) Y. Kudo, H. Kubota, H. Yoshino, and H. Nagamura: "Improvement of working voltage of resistive fault current limiter using YBCO thin film", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.1, pp.33-39 (2002-1) (in Japanese)
工藤由紀・久保田宏・芳野久士・長村英博:「抵抗型 YBCO 薄膜限流素子の高電圧化」, 電学論 B, **122**, 1, pp.858-863 (2002-1)
- (11) K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Nakamura, and Y. Ozawa: "Design of a Large Current-Type Fault Current Limiter with YBCO Films", *Physica C* 372-376, p.1643 (2002)
- (12) K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Nakamura, and Y. Ozawa: "Current distribution measurement in YBCO thin film for a superconducting fault current limiter", *Cryogenics*, Vol.43, p.111 (2003)
- (13) K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Nakamura, and K. Yasuda: "Quench characteristics of fault current limiting element with YBCO thin film", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol.13, No.2, p.2108 (2003)
- (14) K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Yamamoto, and K. Yasuda: "Current limiting and normal operation characteristics of parallel connected fault current limiting elements with YBCO films", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.4, pp.625-633 (2004-4) (in Japanese)
下畑賢司・横山彰一・稲口 隆・山本俊二・安田健次:「イットリウム系高温超電導薄膜を並列接続した限流素子の限流特性および連続通電特性の検討」, 電学論 B, **124**, 4, pp.625-633 (2004-4)

下畑 賢 司 (正員) 1962 年 5 月 18 日生。1987 年大阪大学大学院理学研究科物理専攻修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。主として超電導応用、電磁機器の研究に従事。現在、先端技術総合研究所勤務。

横山 彰 一 (正員) 1960 年 1 月 4 日生。1984 年長岡技術科学大学大学院電子機器工学専攻修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。2002 年度東北大学客員助教授。主として超電導応用に関する研究に従事。現在、先端技術総合研究所勤務。工学博士。

小 寺 溢 男（非会員） 1944 年 5 月 31 日生。1963 年兵庫県立相生産業高等学校機械科卒業。同年 4 月三菱電機（株）入社。先端技術総合研究所勤務。主として，SR 装置の研究・開発，超電導発電機など超電導磁石装置の冷却技術に関する研究・開発に従事。低温工学協会，日本真空協会会員。

安 田 健 次（正員） 1955 年 10 月 15 日生。1978 年 3 月岐阜大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月中部電力（株）入社。主として送変電設備建設，保守に従事。2002 年 7 月超電導発電関連機器・材料技術研究組合（Super-GM）出向。交流超電導機器実用化に向けた研究開発に従事。交流機器技術部長。