抵抗型 YBCO 薄膜限流素子の高電圧化

正員 工藤 由紀 (東芝)

正員 久保田 宏 (東芝)

非会員 芳野 久士 (東芝)

正員 長村 英博 (Super-GM)

Improvement of Working Voltage of Resistive Fault Current Limiter using YBCO thin films

Yuki Kudo, Member, Hiroshi Kubota, Member, Hisashi Yoshino, Non-member, (Toshiba)

Hidehiro Nagamura, Member (Super-GM)

We developed a current limiting element consists of the YBCO thin film on the sapphire substrate and the Ni film on the AlN substrate to improve a working voltage. The YBCO thin film was connected electrically to the Ni film in parallel. When the YBCO thin film changed to the normal state due to the excess current, the current diverted from the YBCO thin film to the Ni film, and the heat shock to the YBCO thin film was reduced. The working voltage per unit length was 43.3V/cm, which was three times as high as that of the element without the Ni film on AlN. And we constructed a module with six elements connected in series. When the excess current flowed in the module, all elements changed to the normal state and working voltage was at least 1.87kV.

キーワード：YBCO 薄膜、限流素子、抵抗型、サファイア、モジュール

Keyword : YBCO thin film, fault current limiter, resistive, sapphire, module

1. はじめに

近年、電力の高効率利用や安定供給のために電力系統間の連系が行われ、これにより短絡や地絡事故による事故電流が増加する傾向にある⁽¹⁾。この事故電流増加に対応するためには遮断器等の電力機器を大容量型へ取替えなければならないが、事故電流を絞る限流素子を連系点に導入できれば取替えを行わなくて済む。そのため限流素子に対するニーズは高く、これまでに半導体や超電導体を用いた様々な方式の限流素子が検討されている⁽²⁾。その中でも超電導体を用いた方式では通常通電時の抵抗が非常に小さいためエネルギーロスが少なく、その実現に期待が持たれる。ところで、超電導体を用いた限流素子には大きく分けて抵抗型^{(3)~(13)}、磁気遮蔽型^{(14),(15)}、ダイオードブリッジ型^{(16),(17)}がある。中でも抵抗型超電導限流素子は、過大な電流が流れた際に超電導状態から常電導状態へ転移する現象を直接利用しており、自己トリガにより高速に抵抗を発生する、鉄心を用いないため小型化に有利であるといった優れた特徴を持っている。そのため、精力的に研究開発が行われており、金属系超電導線材を用いた抵抗型限流素子では既に 6.6kV 級が試作されている⁽¹²⁾。しかし冷却に液体 He を使用するため冷却コストが大きいという問題がある。一方、近年の高温超電導材料開発の進展に伴い、液体窒素で冷却できる高温

超電導材料を用いた大容量の限流素子の研究が盛んになっている。例えばシーメンスは 4 インチφのサファイア基板上に作製した YBCO 薄膜を用いた限流素子を 4 並列 5 直列接続させたモジュールを作製し、3kV/120A 級の限流特性を報告している⁽¹³⁾。しかしながら、現状では YBCO 薄膜限流素子の耐電圧が電力系統の電圧に比べ小さく、実用レベルの限流素子はまだ実現できていない。そこで、我々は YBCO 薄膜限流素子の耐電圧向上が実用化のために最も重要な開発課題と考え、研究開発を進めている。

YBCO 薄膜限流素子の耐電圧を向上させるための施策として、①一つの限流素子の耐電圧向上、②複数の限流素子の直列化が考えられる。①のためには、単位長さ当たりの耐電圧向上と YBCO 薄膜の長尺化（大面積化）が必要である。特に単位長さ当たりの耐電圧向上は小型化とコスト削減の観点から重要である。また②は 6.6kV 級や 66kV 級といった実用レベルの限流素子を実現するためには必須であると考えられる。本論文では YBCO 薄膜限流素子の耐電圧向上のために、単位長さ当たりの耐電圧向上と直列化について検討した。まず、単位長さ当たりの耐電圧向上のために、耐電圧の決定要因について考察し、素子構造の改良を行った。この改良により、従来構造の素子よりも耐電圧を 3 倍以上に向上させることができた。また、直列化による耐電圧向上においては、素子 6 枚を直列接続したモジュールを

作製し限流特性を調べた。その結果、すべての素子が均一に動作し、直列化により耐電圧を向上できることが分かった。また、モジュールに印加された電圧は 1.87kV であった。

2. 単位長さ当たりの耐電圧向上

ここではまず YBCO 薄膜単体を用いた素子および従来構造である YBCO 薄膜上に Ag を被覆した素子の限流特性を測定し、YBCO 薄膜限流素子の耐電圧の決定要因について考察する。次に、この考察を元に素子の構造を改良し、その限流特性について述べる。なお、本論文で用いる耐電圧は 50Hz の半サイクルの過電流を流した条件において、素子破壊が生じる電圧と定義した。

<2.1> YBCO 薄膜単体を用いた限流素子

まず YBCO 薄膜単体の耐電圧特性について知るために、YBCO 薄膜の両端に電流導入端子を設けた限流素子を作製した。図 1 に素子構造を示すように素子 1 では CeO_2 バッファ層を設けたサファイア基板 ($65 \times 10 \times 1\text{mm}$) 上の YBCO 薄膜 (300nm) の両端 10mm に電流導入端子として Ag 電極 ($1\mu\text{m}$) を設けている。なお、この YBCO 薄膜単体を用いた素子 1 と <2.2> で述べる YBCO 薄膜上に Ag を被覆した素子 2 の大きさ、室温抵抗、 T_c 直上の常電導抵抗、臨界電流 I_c をまとめて表 1 に示す。

図 1 YBCO 薄膜単体を用いた限流素子 (素子 1)

Fig.1 Fault current limiting element using YBCO thin film (FCL1)

表 1 素子 1 と素子 2 の大きさ、室温抵抗、 I_c
Table 1 Size, resistance at room temperature(RT) and I_c of FCL 1 and FCL 2

	FCL1	FCL2
Size of sapphire	$65 \times 10 \times 1\text{mm}$	$65 \times 10 \times 1\text{mm}$
Thickness of Ag thin film	without Ag thin film	200nm
Resistance at RT	37Ω	0.68Ω
Resistance at 90K	11Ω	0.23Ω
I_c	85A	72A

素子 1 を液体窒素中で冷却し図 2 に示す交流電源を用いた試験回路により 50Hz の半波電流を素子に流して限流特性を調べた。図 2 において印加電圧 V_c はトランスのタップにより変え、限流素子以外の回路インピーダンスは 0.1Ω とした。図 3 に $V_c=60\text{Vrms}$ の条件において素子に流れた電流波形と素子で発生した電圧波形を示す。図中、矢印で示した時間に電流および電圧が急激に変化している。また、試験

の際、目視において発光が観測された。試験後、液体窒素から素子を取り出したところ、YBCO 薄膜が断線していることが分かった。これらから図 3 の矢印で示した限流初期に YBCO 薄膜が断線してしまったと考えられる。また、他の YBCO 薄膜単体を用いた素子を試験した場合も同様に限流初期に断線してしまうことが分かった。このように YBCO 薄膜単体を用いた限流初期に断線してしまう理由は以下のように考えられる。

図 2 試験回路

Fig.2 testing circuit

図 3 素子 1 の限流特性 ($V_c=60\text{Vrms}$)

Fig.3 Current limiting properties of FCL 1

一般に、過電流により YBCO 薄膜限流素子が抵抗を発生した場合、単位面積当たりの熱負荷 P は

$$P = \frac{I^2 r}{Wl} \quad (1)$$

と表される。ここで、 I は素子に流れた電流、 r は素子で発生した抵抗、 W は素子の幅、 l は抵抗を発生した領域の長さを示す。今、図 4(a)に示すように YBCO 薄膜が均一ではなく局所的に常電導転移した場合と(b)に示すように YBCO 薄膜が均一に常電導転移した場合に分けて考えてみる。

まず、図 4(a)のように局所的に常電導転移、回路抵抗 R_2 より素子の発生抵抗 r が非常に小さい場合、単位面積当たりの熱負荷 P_f は次のように表される。

$$I = \frac{V_c}{R_z + r} \approx \frac{V_c}{R_z}$$

$$P_1 = \frac{I^2 r}{Wl} \approx \frac{V_c^2 R}{W^2 R_z^2} \quad (2)$$

ここで、 R は素子のシート抵抗を表し、 $r=R \cdot l/W$ である。

一方、図 4(b)のように均一に長さ L の素子すべてが常電導転移し、 R_z より素子の発生抵抗 r が非常に大きい場合、単位面積当たりの熱負荷 P_2 は以下のように表される。

$$I = \frac{V_c}{R_z + r} \approx \frac{V_c}{r}$$

$$P_2 = \frac{I^2 r}{WL} \approx \frac{V_c^2}{L^2 R} \quad (3)$$

(2)式より、局所的に常電導転移し素子の発生抵抗が小さい場合、熱負荷は素子のシート抵抗に比例することが分かる。それに対し、(3)式より均一に常電導転移する場合は熱負荷はシート抵抗に反比例することが分かる。

ところで、一般に YBCO 薄膜は完全には均一ではなく臨界電流 I_c にばらつきがあるため、電流が増加した際にまず I_c の低いところで局所的に抵抗が発生すると考えられる。局所的に抵抗が発生した場合、(2)式で示したように素子のシート抵抗が大きいほど常電導転移した領域の熱負荷は大きい。表 1 に示すように YBCO 薄膜単体の素子の常電導抵抗は数十 Ω と大きい。そのため、局所的に常電導転移した際の熱負荷がサファイア基板上 YBCO 薄膜の耐熱衝撃性を超えてしまうほど過度に発熱した領域、いわゆるホットスポットが発生し、限流初期に断線してしまったと考えられる。

図 4(a) YBCO 薄膜が不均一な場合
Fig.4(a) Inhomogeneous YBCO thin film

図 4(b) YBCO 薄膜が均一に抵抗が発生した場合
Fig.4 (b) Homogeneous YBCO thin film

<2.2> Ag を被覆した YBCO 薄膜限流素子

従来の YBCO 薄膜限流素子では YBCO 薄膜上に Ag や Au などの低抵抗金属を被覆しシート抵抗を下げていた。<2.1>の考察よりシート抵抗の低減により局所的に常電導転移した際の熱負荷 P_1 を低減できると考えられる。この考えを検証するため、YBCO 薄膜上に Ag を被覆した素子を作製し限流特性を調べた。図 5 に従来の素子の構造を示す。この素子 2 では YBCO 薄膜上に Ag 薄膜 (200nm 厚) を被覆した。なお、両端 10mm は Ag 電極 ($1\mu\text{m}$) を設けた。表 1 に示すように YBCO 薄膜単体の素子 1 に比べ素子 2 の常電導抵抗は数十の一と小さくなっている。

図 5 従来型の Ag 薄膜を被覆した YBCO 薄膜限流素子 (素子 2)

Fig.5 fault current limiting element using YBCO thin film with Ag (FCL2)

この素子 2 を液体窒素で冷却し図 2 で示した回路を用いて試験した。図 6 は図 3 と同じ $V_c=60\text{Vrms}$ の条件で試験した結果である。図 6 より、素子がない場合の推定短絡電流 850A を 190A で限流し始め、過電流を抑制している。このように、Ag を被覆し限流素子のシート抵抗を低減することにより限流初期に断線することなく素子が動作することが分かった。また、このとき素子に印加された電圧は 77V であり、単位長さあたりの印加電圧は 11.8V/cm (電極部分を除いた場合、17.1V/cm) であった。

図 6 素子 1 の限流特性 ($V_c=60\text{Vrms}$)
Fig.6 current limiting properties of FCL 1 ($V_c=60\text{Vrms}$)

次に $V_c=80V_{rms}$ に印加電圧を増加させた場合の限流特性を図 7 に示す。図 7 より電圧ピーク付近で波形が乱れていることが分かる。試験の際、目視において発光が観測された。試験後、素子を液体窒素から取り出して調べたところ、YBCO 薄膜が断線していることが分かった。これは図中矢印で示した時点で YBCO 薄膜が断線したと考えられる。耐電圧は 107V であり、長さ当たりの耐電圧は 16.5V/cm (電極部分を除いた場合、23.8V/cm) であった。このように、Ag を被覆した場合も印加電圧を大きくしすぎると限流中に断線することが分かった。この断線が生じた電圧ピーク付近において、YBCO 薄膜限流素子のほとんどの領域が常電導転移しているため、熱負荷は(3)式で表すことができ、この熱負荷が許容限度以上になったため断線したものと考えられる。熱負荷を低減するためには(3)式よりシート抵抗 R が大きいほうが良い、言い換えれば、 R が大きいほど長さ当たりに印加できる電圧を大きくできることが分かる。しかしながら<2.1>で述べたように限流初期の断線を防ぐためには R はある程度小さくする必要があり、そのために限流中、素子に印加できる電圧が制限されていると考えられる。

図 7 素子 1 の限流特性 ($V_c=80V_{rms}$)
Fig.7 current limiting properties of FCL 1 ($V_c=80V_{rms}$)

<2.3> 分流層を設けた YBCO 薄膜限流素子

以上の考察から、我々は限流初期のホットスポットの発生を抑制し、かつ限流中の YBCO 薄膜の熱負荷を低減するために、図 8 に示すように、YBCO 薄膜と、YBCO 薄膜とは別基板に作製した金属薄膜とを電氣的に並列接続した構造を持つ素子を考案した。図 8 の素子 3 では CeO_2 パッファ層 (30nm 厚) を設けたサファイア基板 ($120 \times 10 \times 1mm$) 上に作製された YBCO 薄膜 (300nm 厚) と、AlN 基板 ($120 \times 50 \times 5mm$) 上に設けた Ni 薄膜 (200nm 厚) とを In 線により並列接続している。YBCO 薄膜の電流端子およびパイ

パス電極のみ Ag 薄膜を被覆した。表 2 に素子 3 の大きさと抵抗を示すように、YBCO 薄膜の室温抵抗に比べ Ni 薄膜の抵抗は小さい値になっている。これにより通常時の電流は YBCO 薄膜を流れているが、過電流により YBCO 薄膜が常電導転移した際、In 線を介して Ni 薄膜へほとんどの電流が分流する。また常電導転移が局所的な場合も YBCO 薄膜を流れていた電流が Ni 薄膜へ十分に分流するように複数箇所を並列接続させた。これにより、YBCO 薄膜のシート抵抗が大きくてもホットスポットの発生を抑制することができる。

図 8 分流層を設けた YBCO 薄膜限流素子の構造 (素子 3)
Fig.8 Schematic drawing of fault current limiter using YBCO thin film and shunt layer

表 2 素子 3 の臨界電流、大きさ、室温抵抗

Table 2 I_c , size, and resistance at room temperature (RT) of FCL 3

I_c	72A
Size of sapphire	$120 \times 10 \times 1mm$
Size of AlN	$120 \times 50 \times 1mm$
Resistance of YBCO thin film at RT	85Ω
Resistance of Ni film at RT	1.4Ω

この素子において、発生抵抗が小さい限流初期に YBCO 薄膜に加わる単位面積当たりの熱負荷 P_3 は次のように表すことができる。

$$r_m \ll r_y \text{ の場合, } I_y = \frac{r_m}{r_y + r_m} I \approx \frac{r_m}{r_y} I$$

$$P_3 = \frac{I_y^2 r_y}{W l} \approx \frac{I^2 r_m^2}{W l r_y} \quad (4)$$

ここで、図 9 に模式的に回路図を示すように、 I_y は YBCO 薄膜に流れる電流、 r_y は YBCO 薄膜の抵抗、 l は抵抗を発生

した領域の長さ、 r_m は Ni 薄膜の抵抗を示している。なお、分流は高速に行われ、分流量は抵抗により決定されると仮定した。(4)式より、Ni 薄膜の抵抗 r_m を小さな値に設定することが P_3 の低減に有効であることが分かる。

図9 分流層を設けた YBCO 薄膜限流素子の場合
Fig.9 fault current limiting element with metal film

一方、長さ L の YBCO 薄膜全ての領域が常電導転移した場合の単位面積当たりの熱負荷 P_4 は次のように表される。

$$r_m \gg R_z \text{ の場合、 } I \approx \frac{V_c}{r_m}, \quad I_y \approx \frac{V_c}{r_y}$$

$$P_4 = \frac{I_y^2 r_y}{WL} \approx \frac{V_c^2}{L^2 R_y} \quad (5)$$

ここで、 R_y は YBCO 薄膜のシート抵抗であり、 $r_y = R_y L / W$ である。改良した素子は YBCO 薄膜上に Ag を被覆していないため R_y が大きい。そのため、Ag を被覆した場合に比べ限流中の熱負荷 P_4 を小さくできる。言い換えれば同じ熱負荷に達する単位長さ当たりの電圧を向上することができると考えられる。

そこで素子 3 を液体窒素中で冷却し、図 2 に示す試験回路を用いて限流特性を調べた。なお、素子に印加する電圧を増加させるため<2.1>および<2.2>の試験回路とは異なるトランスを用いた。 $V_c = 440\text{Vrms}$ 、回路インピーダンス 0.34Ω の条件の試験結果を図 10 に示す。ここで推定短絡電流の位相が遅れているのは、本試験に用いたトランスのインダクタンスが大きいこと、限流素子がない場合の回路インピーダンスはインダクタンス成分が主であるのに対し、限流素子が動作した場合は抵抗成分が主となるためである。図 10 より限流初期に断線することなく、推定短絡電流 1800A を 440A 以下に抑制していることが分かる。また素子に印加された電圧は 520V で、単位長さ当たりの印加電圧は 43.3V/cm （電流端子およびバイパス電極を除いた場合、 74.3V/cm ）であった。電源容量の制限より断線するまで電圧を印加することができなかったが、この値は図 5 の従来構造である素子 2 の耐電圧の 3 倍以上であり、改良した素子構造は耐電圧向上に有効であることが分かった。

図10 素子3の限流特性
Fig.10 current limiting properties of FCL 3

3. 1kV 級 6 直列接続限流モジュール

以上のように素子構造を改良することにより単位長さ当たりの耐電圧を向上できることが分かった。さらなる大容量化のためには複数の素子を直列接続させる必要があり、その際、各素子が均一に動作するかどうかは課題となる。ここでは<2.3>で述べた構造の素子 6 枚を直列接続したモジュールを作製し限流特性を調べ、直列接続による高電圧化の可能性を検討した。

図11 6直列接続モジュール
Fig.11 six elements connected in series

表3 各限流素子の I_c と室温抵抗

FCL	A	B	C	D	E	F
$I_c(\text{A})$	95	84	83	82	82	76
$R_t(\Omega)$	0.83	0.81	0.81	0.77	0.75	0.51

図 11 に示す 6 直列接続モジュールには表 3 に示した素子を 6 枚使用した。素子間の I_c のばらつきはおおよそ 10% 程度であった。このモジュールには 71A(50A_{rms}) の連続通電が可能であった。このモジュールの評価には図 12 に示す LC 共振回路を用いた。コンデンサ C に充電した後、スイッチ B を閉じて過電流を流し、モジュールの各素子が発生する電圧を PT を介して観測した。なお、本試験で用いた回路の回路定数に制限があり、この LC 共振回路を用いた試験と 2 章で述べた交流電源を用いた試験では、素子に投入されるエネルギー量が異なっている。そのため試験結果を単純に比較することはできない。しかしながら、LC 共振回路においても短絡事故を模擬した大電流を素子に流すことが可能であり、直列接続したモジュールにおいては過電流により各素子が均一に動作するかどうかを知ることは十分可能である。そのため今回、直列接続モジュールの試験には過電流および高電圧を簡単に印加できる LC 共振回路を用いた。

図 12 LC 共振を用いた試験回路

Fig.12 Testing circuit using LC

図 13 6 直列接続モジュールの限流特性

Fig.13 Current limiting properties of six-connected module

限流モジュールを $L=1.73\text{mH}$ 、 $C=600\mu\text{F}$ 、充電電圧 2.5kV の条件で試験した結果を図 13 に示す。図より点線の推定短絡電流 1070A を 630A 以下に抑制していることが分かる。また、素子に印加された電圧は 1.87kV であった。図 14 に各素子の電圧発生を拡大図を示すように、すべての素子が 0.05ms 以内の間に電圧を発生しており均一に動作している

ことが分かった。なお、素子 F の発生電圧が他の 5 つの素子に比べ小さいが、表 3 に示したように常電導抵抗が小さいためである。また、 $t=0$ 付近の電圧振動は、エネルギー投入時のノイズの影響と考えられる。以上のように直列接続したモジュールにおいて各素子が均一に動作したことから、直列化により耐電圧を向上できると考えられる。

図 14 各素子の発生電圧

Fig.14 Voltage drops of each FCL

4. むすび

YBCO 薄膜限流素子の耐電圧向上のために素子構造の改良と直列接続を行い、以下の知見を得た。

①YBCO 薄膜と、YBCO 薄膜とは別基板に設けた金属薄膜とを並列接続した限流素子において、単位長さ当たりの耐電圧を金属薄膜がない素子に比べ 3 倍以上に向上できることが分かった。

②上記改良した素子を用いて 6 直列接続モジュールを作製した。このモジュールには 71A (50A_{rms}) の連続通電が可能であり、過電流によりすべての素子が動作することが分かった。また、モジュールに印加された電圧は 1.87kV であった。

以上のように素子構造の検討と素子の直列接続により耐電圧向上のための見通しを得ることができた。しかしながら、今回の YBCO 薄膜および分流用金属薄膜の基板厚や面積、抵抗比、バイパス電極の間隔といった素子の設計パラメータは最適化されたものではない。今後、分流現象を解析することにより、これらのパラメータの最適化を図り、単位長さ当たりの耐電圧向上を目指す。また、直列化した場合の動作特性は過電流の電流上昇率および各素子の I_c のばらつきに依存すると考えられる。今後、電流上昇率や I_c のばらつきと限流特性との関係を明確にし、素子設計にフィードバックする予定である。

本研究は、通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」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 12 年 11 月 24 日受付、平成 13 年 6 月 8 日再受付)

文 献

- (1) 「21 世紀に向かう電力系統における新しい開閉責務」電気学会技術報告第 774 号, 2000 年
- (2) 「故障電流抑制用限流技術の現状と展望」電気学会技術報告第 709 号, 1999 年
- (3) H. Kubota, Y. Kudo, M. Yamazaki, H. Yoshino, H. Nagamura, "A new model of fault current limiter using YBCO thin film", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, No. 2, P1365 (1999)
- (4) Y. Kudo, H. Kubota, M. Yamazaki, H. Yoshino, H. Nagamura, "400V class resistive fault current limiter using YBCO thin films", Advances in Superconductivity XII. Proceedings of the 12th International Symposium on Superconductivity (ISS'99), P.848 (2000)
- (5) Y. Terashima, M. Yamazaki, Y. Kudo, H. Yoshino, K. Ando, S. Oshima, "Fault current limiter using YBa₂Cu₃O_{7-x} superconductive film, Advances in Superconductivity VII. Proceedings of the 7th International Symposium on Superconductivity (ISS'94), P.1207 (1995)
- (6) B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kramer, P. Kummeth, H.-W. Neumuller, S. Fischer, "Resistive current limiter with YBCO films", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, No. 2, p. 828 (1997)
- (7) B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, H.-W. Neumueller, E. Baltzer, S. Fischer, B. Heismann, "Resistive fault current limiters with YBCO films-100kVA functional model", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, No. 2, p. 656 (1999)
- (8) A. Heinrich, R. Semerad, H. Kinder, H. Mosebach, M. Lindmayer, "Fault current limiting properties of YBCO-films on Sapphire substrate", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, No. 2, p. 660 (1999)
- (9) R. Wordenweber, J. Schneider, A. I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs, P. Lahl, "Current limiting properties of superconducting YBa₂Cu₃O₇ films on various substrate", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 7, No. 2, p. 1021 (1997)
- (10) J. Noudem, J. M. Barbut, O. Belmont, J. Sanchez, P. Tixador, R. Tournier, "Current limitation at 1080 A under 1100V with Bulk Bi-2223", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, No. 2, p. 664, (1999)
- (11) M. Morita, T. Tokunaga, Y. Yang, O. Miura, D. Ito, "S-N transition of QMG current limiting elements with metal coat", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, No. 2, p. 1316 (1999)
- (12) T. Yazawa, E. Yoneda, S. Nomura, K. Tsurunaga, M. Urata, T. Ohkuma, S. Honjo, Y. Iwata, T. Hara, "Experiments with 6.6kV/1kA single-phase superconducting fault current limiter", Proceedings of EUCAS 1997, P.1183 (1997)
- (13) B. Gromoll et. al., "1MVA resistive current limiter with

YBCO films" presented at EUCAS 1999, Spain

- (14) W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, P. Unternahrer, T. Baumann, M. Chen, L. Widenhorn, A. Guerig, "Test of 1.2MVA high-Tc superconducting fault current limiter", Applied Superconductivity 1997. Proceedings of EUCAS 1997, p.1173, (1997)
- (15) H. Kado, M. Ichikawa, "Performance of a high-Tc superconducting fault current limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 7, No. 2, p.993 (1997)
- (16) E. M. Leung, A. Rodriguez, G. W. Albert, B. Burley, M. Dew, P. Gurrola, D. Madura, G. Miyata, K. Muuehlemann, L. Nguyen, S. Pidcoe, S. Ahmed, G. Dishaw, C. Nieto, I. Kersenbaum, B. Gamble, C. Russo, H. Boenig, D. Peterson, L. Motowildo, P. Halder, "High temperature superconducting fault current limiter development", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 7, No. 2 (1997)
- (17) 大熊武、佐藤礼文、高橋芳久、矢澤孝、米田えり子、松崎順、酒井正弘、野村俊自、「6.6kV 整流器型減流器の開発(1)」第 62 回 2000 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p.224

工藤 由紀 (正員) 1968 年 1 月 27 日生。92 年 3 月

東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (株) 東芝に入社。主として高温超電導薄膜の応用研究に従事。低温工学協会、応用物理学会会員。

久保田 宏

(正員) 1957 年 9 月 2 日生。88 年 3 月東京工業大学大学院物理学専攻博士課程修了。同年 4 月 (株) 東芝に入社。主として高温超電導薄膜の応用研究に従事。低温工学協会、日本物理学会会員。理学博士。

芳野 久士

(非会員) 1948 年 8 月 8 日生。73 年 3 月東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月 (株) 東芝に入社。機能性金属・無機材料の研究開発に従事し、現在主として高温超電導体の研究に従事。低温工学協会、金属学会、応用物理学会会員。工学博士。

長村 英博

(正員) 1954 年 3 月 10 日生。77 年 3 月東京工業大学電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝に入社。83~84 年日本原子力研究所外来研究員。88 年火力・原子力電機技術部。98~99 年 Super-GM 出向。2000 年火力産業・IPP 技術部。主に、核融合や加速器用電源システム設計、超電導発電機の開発などに従事。火力原子力協会会員。