

## Improvement of Electric Strength for High Voltage Connectors in J-PARC RCS Kicker System

Kazuaki Suganuma<sup>1</sup>, Junichiro Kamiya, Masao Watanabe, Tomohiro Takayanagi,  
Tomohito Togashi, Tomoaki Ueno  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirane, Shirakata, Tokai, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

J-PARC RCS Kicker System is an electromagnet system with a charging voltage of 60kV and a repetitive pulse of 25Hz. This system has been operated for about 3,500 hours, and the insulating oil became brownish-red and sticky solid materials emerged at the connectors of the coaxial cable for transmitting high-voltage pulse. Then, the frequency of maintenance of power source increased extremely, which became a problem. In order to identify the cause, the author analyzed the gas contained in the discolored insulating oil. The cause was considered to be the deterioration of oil at less than 300 °C and the deterioration of oil due to electric discharge. In addition, the connector configuration simulation was conducted. It was found that electric fields tend to concentrate in the air layer at the upper part of the insulating oil and at the polyethylene tip of the receiving connector. A structure in which electric fields are alleviated was determined with the simulation, and electricity was applied, and the inner condition was observed. As a result, when the inner diameter of the outer cylinder was increased, oil deterioration was alleviated and dielectric strength voltage was improved.

### J-PARC RCSキッカーシステムにおける高電圧コネクタの絶縁耐圧の改善

#### 1. はじめに

J-PARC RCS(Rapid Cycling Synchrotron)におけるキッカーシステムは、充電電圧60kV、繰返し25Hzのパルス電磁石システムである<sup>[1]</sup>。RCS内で3GeVに加速した陽子を50GeV加速器および物質・生命科学実験施設に蹴り出している。表1にキッカーシステムにおける電源の仕様を示す。これまでに3500時間程度の運転を行っている。これまでの運転で、高電圧パルス伝送用同軸ケーブルのコネクタで、絶縁油が茶褐色に変色し、粘着性の固形物が析出し、システムの保守頻度が増えていた。最悪の場合、コネクタ内で短絡し加速器全体の運転を止めてしまう可能性があった。原因調査のため、変色した絶縁油につ

いて、変圧器の異常診断に用いられる油中に含まれるガスの分析を実施した。測定値から300°C以下でおこる油の劣化と放電による油の劣化が推測された。また、コネクタ形状のシミュレーションをおこなった。絶縁油上部の空気層および受側コネクタのポリエチレン先端で、電界の集中が起きやすいことがわかった。電界が緩和される構造をシミュレーションにより決定し、実際に通電し内部の状況を観察した。結果としてコネクタ内部の空気層を無くすことと、内径を広くすることで、油の劣化が減少し絶縁耐圧を改善したので報告する。

#### 2. コネクタ部と固形物の析出

図1にキッカーシステムの系統およびコネクタ位置を示す。キッカーシステムは充電電源、サイラトロン、ダミーロードおよび負荷をそれぞれコネクタ付きの同軸ケーブルで接続している。表2に各コネクタに印加される電圧波形および電流波形を示す。電圧波形および電流波形は、大きく充電時と放電時の2つのパターンに分けられる。コネクタの断面を図2に示す。コネクタは、同軸ケーブルの外導体および被覆を、およそ390mm取り除き、架橋ポリエチレンの内筒に挿入し、先端をマルチコンタクト社製の端子で接続している。同軸ケーブルの内導体の外径はφ18.2mm、ケーブル外径はφ30mmである。外筒は真鍮製で内筒の厚みの増加分内径を変化させた

表1：キッカーシステムの電源仕様

台数	8台
出力波形形状	矩形
繰返し	25Hz
Pulse Forming Network	同軸ケーブル (FHCX-80, Fujikura)
スイッチング	サイラトロン (CX1193C, e2V Technologies)
伝送ケーブル	PFNに同じ
最大充電電圧 (運転時)	80 kV (60kV)
最大出力電流 (運転時)	4000A (3000A)
特性インピーダンス	10 Ω

<sup>1</sup> E-mail: suganuma.kazuaki@jaea.go.jp

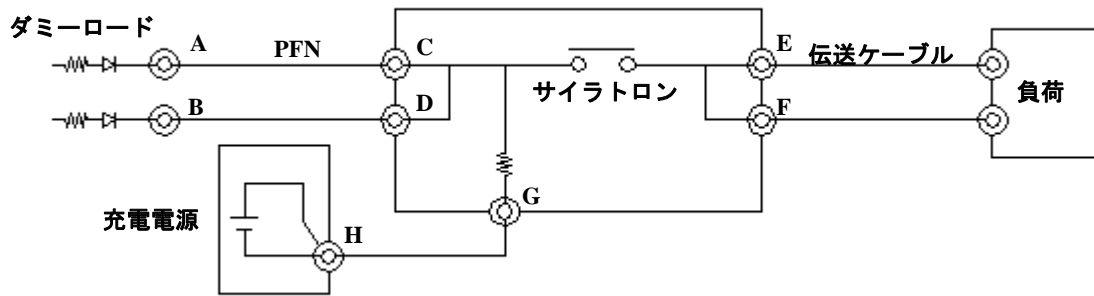


図1：キッカーシステム系統およびコネクタ位置

表2：各コネクタに印加される電圧波形および電流波形

	A,B	C,D		E,F	G,H
電圧波形		(充電時) 	(放電時) 		
電流波形					

構造をとっている。

コネクタ内部の固形物は、外筒の内径が一番細くなっている部分とポリエチレン製の内筒先端部に多く見られた。系統に示すそれぞれの位置のコネクタで、より多く固形物が見られたのは、充電電源から充電部の接続用コネクタGとコネクタHであった。その他のコネクタについても固形物の析出の程度に違いがあるものの、全てのコネクタで固形物が見られた。

### 3. 油中ガス分析

油中ガス分析は、油入変圧器などの異常の有無を早期に検知できることから、電源設備の保守管理に広く採用されている<sup>[2]</sup>。今回、油中ガス分析を利用して、コネクタ内の絶縁油を採取しガスの分析と診断を試みた。約1ヶ月間の通電の後、油を採取し分析をおこなった。表3に分析値の一覧を示す。H<sub>2</sub>（水素）およびC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>（アセチレン）は、一般的な変圧器に例えると、放電により発生する。CH<sub>4</sub>（メタン）、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>（エタン）およびC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>（アセチレン）は、

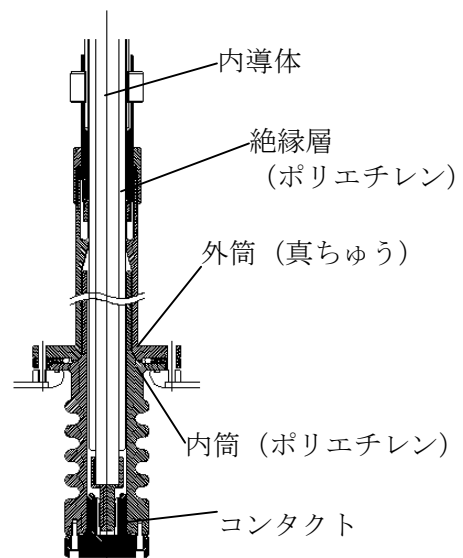


図2：コネクタ断面

表3：油中ガス分析による分析結果

絶縁油	全ガス量	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
未使用	85000	20305	64484	-	-	-	-	-	-	210
通電後	85400	46	58874	690	639	174	59	0.85	1507	23410 (ppm)

一般的な変圧器に例えると、過熱により発生する。CO(一酸化炭素)およびCO<sub>2</sub>(二酸化炭素)は空気層との反応により発生するか、油の酸化劣化以外に使用部材から生成した可能性も考えられる。つぎに、図3に異常診断図を示す。採取した絶縁油において異常診断図などから、低温過熱に微小な放電が起こっていることが推測された。今回、放電に着目してシミュレーションをおこなうことにした。

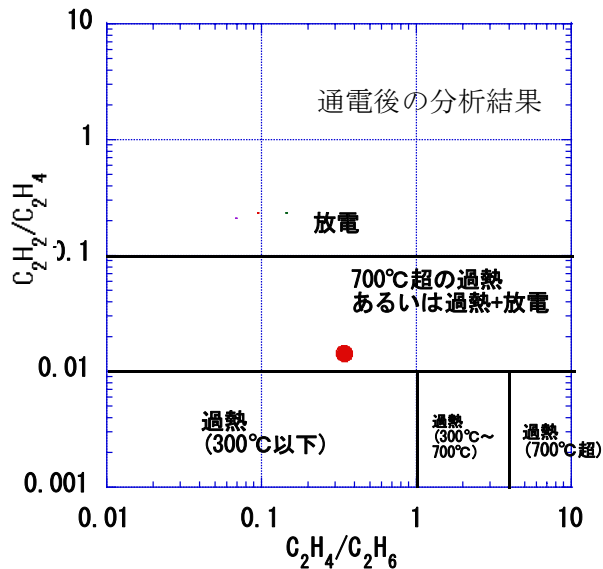


図3：異常診断図

#### 4. シミュレーション

図4に計算モデルを示す。モデルは同軸の内導体、絶縁層、内筒(ポリエチレン)、外導体(外筒)とそれらにある隙間からなっている。運転当初、コネクタ内部に絶縁油を満たしておらず、かつ、絶縁油をどこまで満たしているのか確認できなかった。そのため、気中に露出していたであろう内筒のポリエチレン上部と接地電位である外筒内壁に固形物の析出が多く見られた。このことから内筒先端を空気層として計算した。計算にはANSYSを使用し、静電場計算をおこなった。誘電率は、空気層1.0、絶縁油およびポリエチレンは2.3とした。内筒先端と接地電位(外筒)に電位差が、その距離およそ1mmで7.7kVになる計算の出力値が得られた。つぎに、隙間を全て絶縁油で満たした場合を計算した。計算の出力値は5.5kVであった。一般的に気中での放電開始は3kV/mmから起こるであろう。耐電圧に必要な距離が得られていないと考えられた。これらから、外筒の内側へのせり出しを全て削った形状、すなわち外筒の内径を広げた形状で通電をおこなうことにした。また、コネクタ内を絶縁油で満たし、絶縁油の量を目視で確認できるようにした。改良したコネクタを用いて、約1ヶ月間の連続通電をおこなった。通電後にコネクタ内部を観察したところ、固形物の発生は無かった。図5にコネクタ内部の状況を示す。

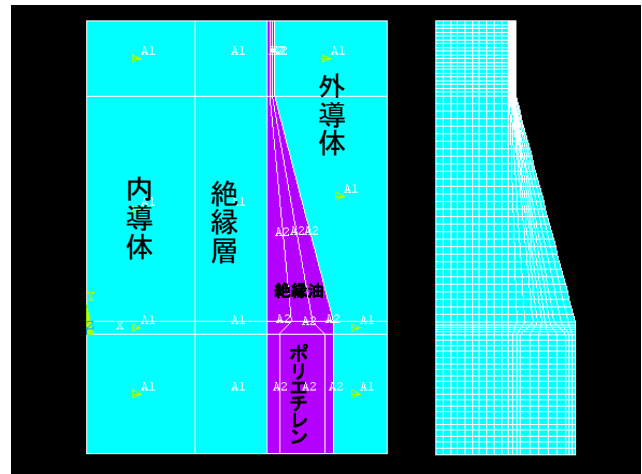


図4：計算モデル

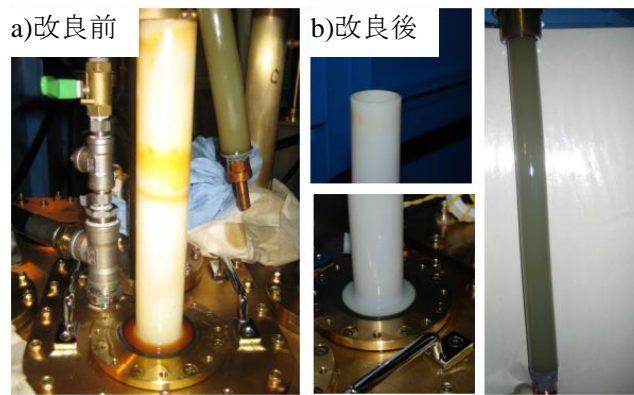


図5：コネクタ内部の状況

#### 4. まとめ

J-PARC RCSのキッカーシステムは、これまでに3500時間程度の運転をおこなっている。これまでの運転で、コネクタ内部の絶縁油が茶褐色に変色し、粘着性の固形物が発生し、保守頻度が増加し問題となっていた。通電後にコネクタ内部の絶縁油を採取し、油中ガス分析を実施し原因を調査した。ガス分析の結果、一般的な変圧器に見られる過熱と放電の診断結果が得られた。放電に着目しシミュレーションをおこなった。シミュレーションの出力値から高い電界が発生していることが分かった。電界の緩和および絶縁油を充填し維持する改良をおこない固形物の発生を抑制することに成功した。今後、シミュレーションとガス分析を系統的におこなう予定である。

#### 参考文献

- [1] J.Kamiya, et al., "Kicker Magnet System of the RCS in J-PARC", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, (Jun 2006) v. 16(2) P168-171
- [2] 技術資料, "油入変圧器の油中ガス分析による保守管理", URL: <http://www.yuka.co.jp/>