

JAERI-Tech

97-025



JT-60電動発電機セルビウス装置の  
絶縁性能劣化対策

1997年7月

大森俊造・日下 誠\*

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。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

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

## J T - 6 0 電動発電機セルビウス装置の絶縁性能劣化対策

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

大森 俊造・日下 誠\*

(1997年5月22日受理)

大型核融合装置 J T - 6 0 の加熱用発電設備の電動発電機セルビウス装置に使用されている F R P (繊維強化プラスチック) 電気絶縁材の絶縁性能劣化について、その原因究明と対策を実施した。絶縁性能の劣化した F R P 表面には、X線光電子分光法等による分析から、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 等の潮解性物質の存在が確認された。絶縁性能の劣化は、これら潮解性物質が湿度の高い時に水分を吸収するためと結論付けられる。なお、これらの潮解性物質は、冷却のために取り込んだ外気中に含まれる酸性物質が F R P 表面に付着・侵入し、F R P の充填剤である炭酸カルシウムと反応して生成されたものと推定できる。また、外気中の酸性物質の発生源は、本セルビウス装置が設置されている建家に隣接する冷却塔で使用されるスライム防止剤と考えられる。従って、この対策としてカルシウムを含まないポリエステル系の F R P 絶縁材に交換し、潮解性物質の生成を無くすことで電気絶縁性能の健全性確保を図った。

---

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂那珂町向山801-1

※出向中：開発電気(株)

Degradation in Dielectric Strength of FRP Insulators and Its Countermeasure  
in a Static Scherbius System Speed Controller of the JT-60 Motor Generator

Syunzo OHMORI and Makoto KUSAKA \*

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

(Received May 22, 1997)

Degradation in dielectric strength of FRP (fiber reinforced plastic) insulators was examined and its countermeasures were taken in a static Scherbius system speed controller of a motor generator for the JT-60 NBI and RF heating devices. Deliquescent substances such as  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  were detected on surfaces of the FRP insulators by X-ray photoelectron spectroscopic analysis. Hence, it is concluded that the degradation of the insulator was caused by these deliquescent substances adsorbing water at high humidity. It is estimated that these deliquescent substances were made by chemical reactions between calcium carbonate contained in FRP and acid substances contained in the cooling air introduced from outside of the MG building.

The acid substances originated in slime - preventive chemicals used in the secondary cooling tower located near the MG building.

Therefore, the insulators are replaced with new ones of calcium carbonate free FRP for maintaining the dielectric strength of the insulators at a good level.

Keywords: Motor Generator, Static Scherbius System, FRP, Degradation in Dielectric Strength, X-ray Photoelectron Spectroscopic Analysis, Deliquescent Substances, Calcium, Acid Substances

---

\* On loan to Kaihatsu Denki Co.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 加熱用発電設備とセルビウス装置 .....	2
2.1 加熱用発電設備とセルビウス装置の概要 .....	2
2.2 セルビウス装置の定格 .....	3
2.3 セルビウス装置の電気絶縁材 .....	4
2.4 セルビウス装置の構造 .....	4
3. セルビウス装置絶縁性能劣化の経緯 .....	6
4. 絶縁性能劣化の原因調査 .....	8
4.1 耐塩化水素性試験 .....	8
4.2 FRP表面の光電子分光分析 .....	10
4.3 FRP表面の化学分析 .....	12
4.4 環境測定 .....	12
5. 絶縁性能劣化メカニズムの考察 .....	14
5.1 不飽和ポリエステルと酸性物質の化学反応 .....	14
5.2 潮解性物質の生成 .....	14
6. 絶縁性能劣化対策 .....	15
6.1 セルビウス装置FRP絶縁材の交換 .....	15
6.2 絶縁補強 .....	15
7. まとめ .....	16
謝 辞 .....	16
参考文献 .....	17
付 録 .....	18

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Motor Generator for Additional Heating Devices and Static Scherbius-System	
Speed Controller .....	2
2.1 Outline of the Motor Generator and the Speed Controller .....	2
2.2 Ratings of the Speed Controller .....	3
2.3 Insulator used in the Speed Controller .....	4
2.4 Structure of the Speed Controller .....	4
3. Details of Degradation in Dielectric Strength of FRP Insulators for the	
Static Scherbius-system Speed Controller .....	6
4. Investigation of Degradation in Dielectric Strength .....	8
4.1 Hydrogen Chloride Resistance Test .....	8
4.2 X-ray Photoelectron Spectroscopic Analysis of FRP Surface .....	10
4.3 Chemical Analysis of FRP Surface .....	12
4.4 Environmental Measurement .....	12
5. Discussion on Degradation in Dielectric Strength .....	14
5.1 Chemical Reaction of Unsaturation Polyester Resin and Acid .....	14
5.2 Production of Deliquescent Substances .....	14
6. Countermeasures against Degradation in Dielectric Strength .....	15
6.1 Replacement of the FRP Insulators for Static Scherbius-System Speed Controller ..	15
6.2 Other Countermeasures for Improving the Dielectric Strength .....	15
7. Concluding Remarks .....	16
Acknowledgment .....	16
Reference .....	17
Appendix .....	18

# 1. はじめに

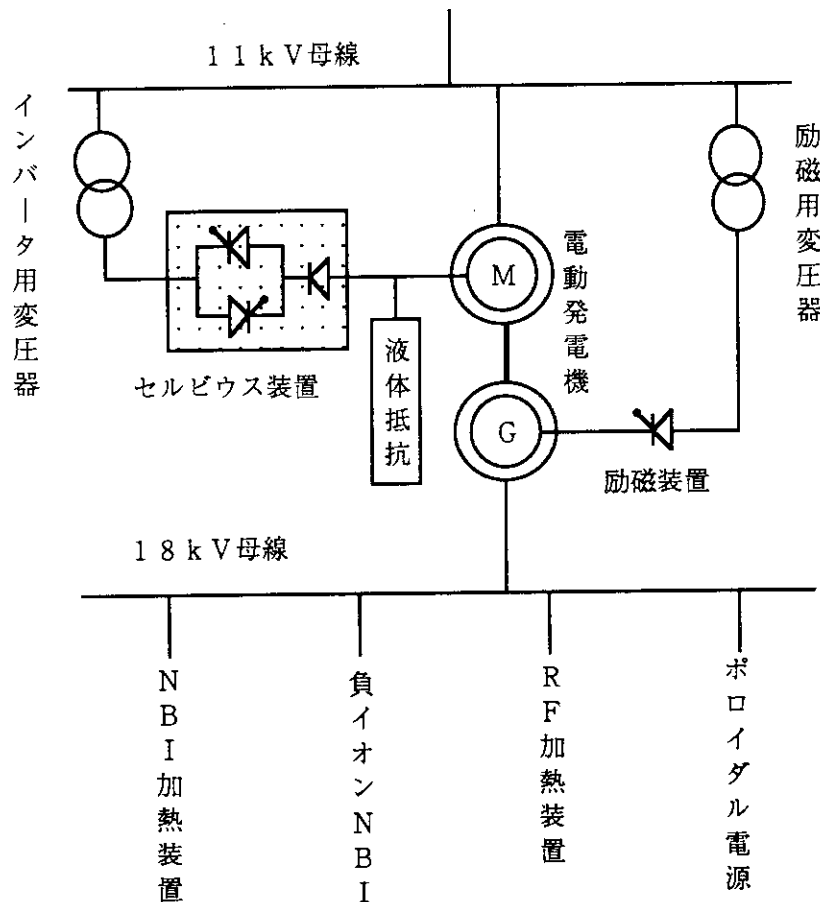
大型核融合実験装置 JT-60 の電源設備であるトロイダル磁場コイル電源、ポロイダル磁場コイル電源及び加熱用発電設備は、各々に電動発電機及びダイオード整流器あるいはサイリスタ変換器が設置されており、JT-60 本体コイル（トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル）へは高電圧直流大電流及び加熱装置（中性粒子入射装置、高周波加熱装置）へは特別高圧交流大電流のパルス電力を供給している。ダイオード整流器あるいはサイリスタ変換器は盤内にコンパクトに組み込まれており、電気絶縁に関しても種々の設計的配慮がなされている。

これら静止型高電圧機器の電気絶縁材としては、ほとんどFRP（繊維強化プラスチック）が使用されている。大容量静止型機器は空気中の塵埃、塩分及び化学物質等の環境的要因で絶縁性能の劣化が徐々に進行する。絶縁の良否を判断するに一般的に簡易方法である絶縁抵抗計により絶縁抵抗値を測定するが、絶縁抵抗値はその時の大気湿度によって大幅に変動する。つまり湿度が高いと絶縁抵抗は低下する。しかも塵埃、塩分及び化学物質等で汚染されると高湿度になった場合は著しく絶縁抵抗値が低下する。屋内機器の場合、高湿度であっても汚染されていなければ通常は数MΩ以上の絶縁抵抗値は保持できる。塵埃、塩分及び化学物質等で汚染されている場合は、高湿度時に1MΩを下回ることもある。絶縁低下の程度によっては、高電圧回路の短絡あるいは地絡事故に至り、機器を焼損させる可能性がある。本報告はJT-60の加熱用発電設備電動発電機のセルビウス装置に用いられているFRP絶縁材の絶縁性能劣化について、その原因調査及び対策に関するものである。絶縁材表面の汚染物質の分析結果をもとにFRP絶縁材の成分物質と汚染物質との化学反応による絶縁性能劣化メカニズムについて明らかにする。

## 2. 加熱用発電設備とセルビウス装置

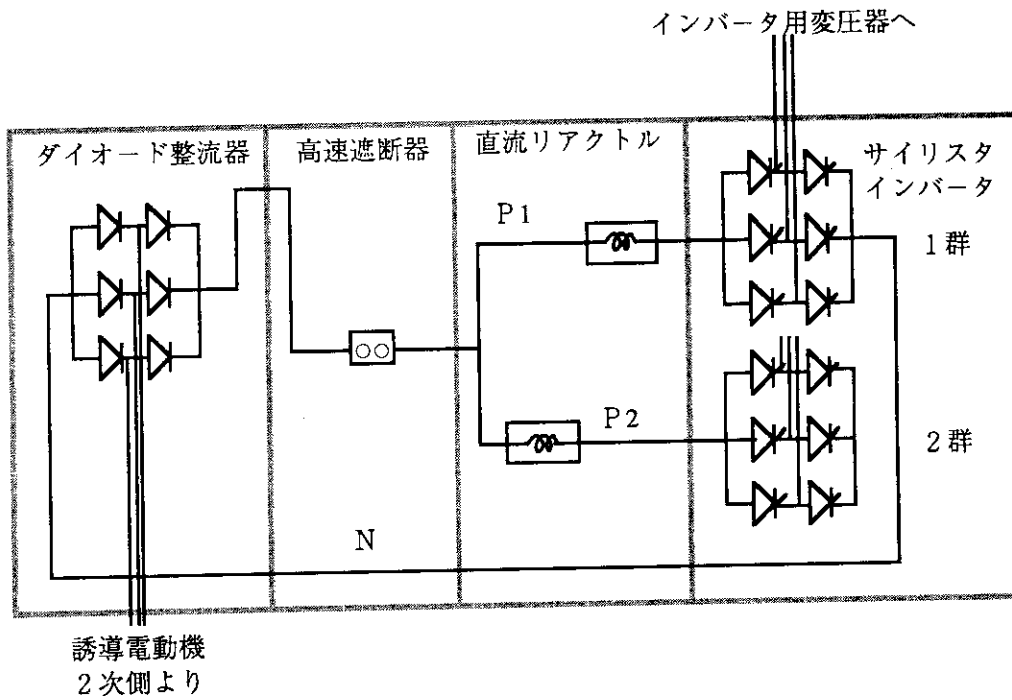
### 2.1 加熱用発電設備とセルビウス装置の概要

JT-60（臨界プラズマ実験装置）の加熱用発電設備は、電動発電機（立軸型 出力400 MVA）によりJT-60加熱装置であるNBI、RF等へ交流大電流のパルス電力を供給している。加熱用発電設備の構成の概略を第2.1図に示す。セルビウス装置は、電動発電機の世界速度制御するための装置であり、加速時には駆動用電動機の回転子巻線に発生した交流起電力をセルビウス装置内のダイオード整流器により直流に変換後、サイリスタインバータにより交流に変換し系統へ電力を返還する。電動発電機の世界速度制御はサイリスタインバータのゲートパルス位相制御により行われる。セルビウス装置の構成を第2.2図に示す。



第2.1図 加熱用発電設備の構成





第2.2図 セルビウス装置の構成

2.2 セルビウス装置の定格

セルビウス装置の定格を第2.1表に示す。電動機加速用としては国内最大級の容量である。

第2.1表 セルビウス装置の定格

シリコン整流器	サイリスタインバータ
定格出力：6707kW 直流電圧：1310V 直流電流：5120A 周波数：1.5～16.1Hz 素子構成：2S×3P×6アーム 製造年：1984	定格出力：6707kW 直流電圧：1310V 直流電流：2560A×2群 素子構成：1S×3P×6アーム 製造年：1984

### 2.3 セルビウス装置の電気絶縁材

加熱用発電設備セルビウス装置の主要構成要素（部品）であるダイオードスタック、サイリスタスタック、ゲート回路アクセサリ、平角導体、サージアブソーバ及び平角導体の盤貫通部の絶縁には、ほとんど全てが繊維強化プラスチック（FRP）が、ごく一部にエポキシ樹脂が使用されている。セルビウス装置FRP絶縁材の成分及び使用個所を第2.2表に示す。これらのFRPは不飽和ポリエステル樹脂に成形後の収縮や膨張を防止するために炭酸カルシウム等が充填されたものである。


第2.2表 FRP成分及び使用個所

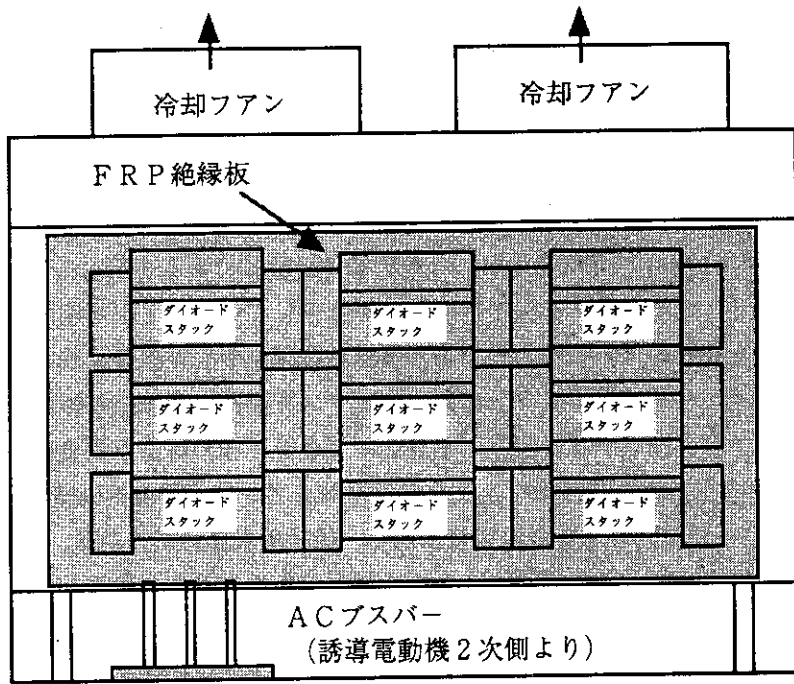
FRP 品名	NP-RM20	NR-3093C	NR-830
成分	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 不飽和ポリエステル</li> <li>・ ガラス繊維</li> <li>・ 炭酸カルシウム</li> <li>・ 硬化触媒（過酸化物）</li> <li>・ 離型剤</li> <li>・ その他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 不飽和ポリエステル</li> <li>・ ガラス繊維</li> <li>・ 水和アルミニウム</li> <li>・ 硫酸バリウム</li> <li>・ 硬化触媒（過酸化物）</li> <li>・ 離型剤</li> <li>・ その他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 不飽和ポリエステル</li> <li>・ ガラス繊維</li> <li>・ 炭酸カルシウム</li> <li>・ 硬化触媒（過酸化物）</li> <li>・ 離型剤</li> <li>・ その他</li> </ul>
使用 個所	ダイオード整流器スタック AC, DCブス貫通部 セレン整流器	インバータスタック	インバータゲート回路用 アクセサリ

### 2.4 セルビウス装置の構造

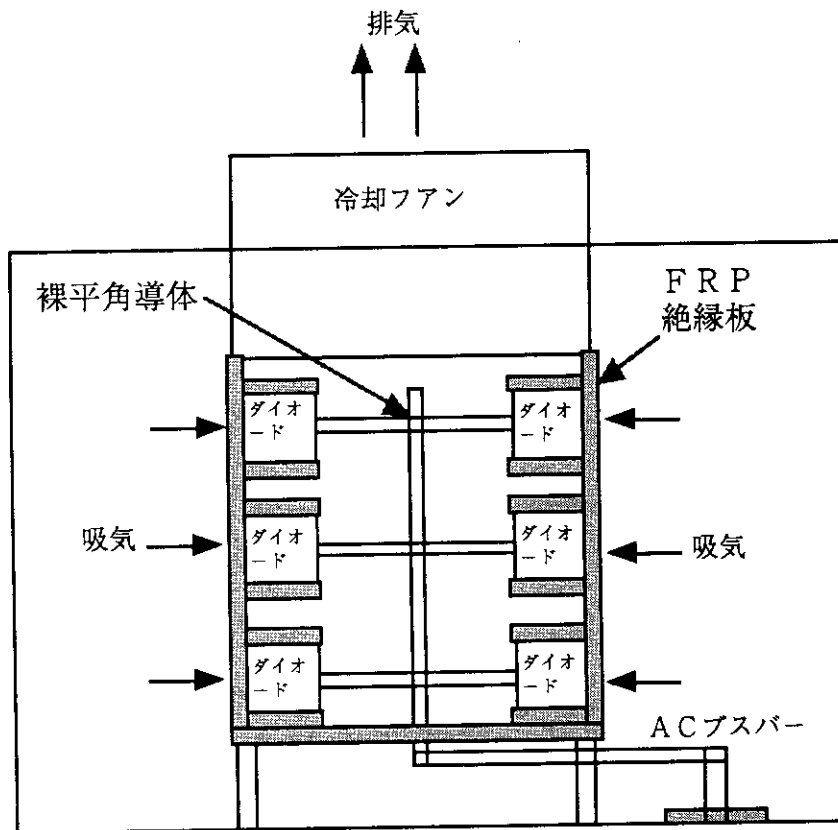
セルビウス装置は、先に述べたように主にダイオード整流器、サイリスタインバータから構成される。ここでは、ダイオード整流器盤の概略構造を第2.3図及び第2.4図に示す。後に述べる用にセルビウス装置の絶縁性能劣化は、このダイオード整流器盤に使用している絶縁材の絶縁性能劣化が主な原因となったからである。

この、絶縁材は第2.2表に示したようにNP-RM20と言う品名である。

第2.3図及び第2.4図において  印は絶縁板を示す。絶縁板の組み合わせによりボックス構造とし、冷却空気は、上側の冷却ファンによってダイオード整流器盤の扉のフィルタを通った後、ダイオードスタックの冷却ファンのすき間から吸い込まれる。なお付録にセルビウス装置分解写真集を示したので参照されたい。



第 2.3 図 ダイオード整流器整正面



第 2.4 図 ダイオード整流器整側面

### 3. セルビウス装置絶縁性能劣化の経緯

加熱用発電設備セルビウス装置は昭和59年に製作され、加熱用発電設備全体として原研に引き渡されたのは、昭和60年3月末である。平成2年に点検を行いセルビウス装置の主回路絶縁抵抗を測定したところ0.4 M $\Omega$ （湿度91%）と最低管理目標値である1 M $\Omega$ を下回った。

調査の結果、サイリスタインバータ部の絶縁抵抗が低下していることが判明し、サイリスタインバータの分解点検を実施した。しかしその後の絶縁抵抗測定でも大幅な改善が見られず再調査の結果、サイリスタインバータとリアクトル間の直流バス貫通部の絶縁板の絶縁が劣化していることが判明した。バス貫通部はできる限りマイラテープを巻く等の対策を実施した結果、湿度91%で3.1 M $\Omega$ まで向上した。原因はリアクトルの冷却ファンは直接屋外吸気方式（リアクトル盤と吸気口の距離は3m程度）であるため環境が悪く、絶縁板表面分析の結果、塩害であることがわかった。そのため平成3年11月にリアクトル冷却方式を屋内吸気に改造した。しかしその後も絶縁抵抗が低下し続け平成6年に0.8 M $\Omega$ （湿度91%）と最低管理目標値である1 M $\Omega$ を下回った。そのため分解調査を行いダイオード整流器の絶縁板の絶縁性能劣化であることがわかった。この絶縁板は不飽和ポリエステル系のFRPで難燃性の向上及び成形後の低収縮性や低線膨張性のために炭酸カルシウムが添加されている。表面の蛍光X線分析（定性）ではNa、Cl、Caが検出されたが定量分析ではCaは検出されていない。CaCl<sub>2</sub>の存在する可能性を考慮してFRP表面物質の光電子分光分析を実施した。その結果、CaCl<sub>2</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>等が検出された。このことからFRPに添加されている炭酸カルシウムと酸性物質が化学反応してこれらの潮解性物質が生成され、高湿度時に水分を吸収して絶縁が劣化することがわかった。これまでにセルビウス装置主回路の絶縁抵抗の測定を実施して絶縁性能の劣化状況を監視してきた。

セルビウス装置の絶縁抵抗と相対湿度の関係を第3.1図に示す。絶縁材交換後については、第6章で述べる。このように湿度が90%程度になると管理目標である1 M $\Omega$ を下回っている。乾燥期に較べて3桁程度絶縁抵抗が低下している。絶縁性能が劣化していなければ高湿度時でも最低5 M $\Omega$ 以上の絶縁抵抗値が得られるものと思われる。



## 4. 絶縁性能劣化の原因調査

カルシウムの充填されているFRPにおいて、蛍光X線分析では内部のカルシウムが検出されているが、表面付着物質の化学分析ではカルシウムが検出されていない。しかし高湿度時に絶縁が極端に悪くなっていることを考えると、塩化カルシウムの存在する可能性が推測された。

このためFRP絶縁材の耐塩化水素性試験及び光電子分光分析を実施して、絶縁性能劣化の原因を究明した。

### 4.1 耐塩化水素性試験

#### (1) 試験の目的

加熱用発電設備セルビウス装置に使用しているものと同一のFRP絶縁材及び新たに絶縁劣化対策に有効であると想定される絶縁材(Caフリー)について耐塩化水素性試験を実施して、耐塩化水素性を調べ、絶縁劣化メカニズムを究明するとともに新たな対策品となり得る材質を探ることが目的である。

#### (2) 供試品

耐塩化水素性試験の供試品は以下の①～⑥の6サンプルである。サンプル寸法は厚さ2mm、幅100mm、奥行100mmである。

- ① NR-830 (不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{CaCO}_3$ )
- ② NR-3093C (不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{BaSO}_4$  一部 $\text{Al}(\text{OH})_3$ )
- ③ NR-3000CE (不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{Al}(\text{OH})_3$ )
- ④ NP-RM20 (不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{CaCO}_3$ )
- ⑤ NP-RM (不飽和ポリエステル樹脂)
- ⑥ EP-R (エポキシ樹脂)

#### (3) 試験方法

##### ① 塩化水素ガス雰囲気

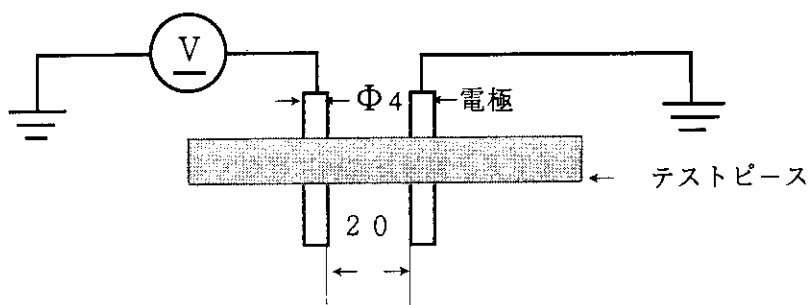
36%塩酸を使用して、デシケータ中の塩化水素ガス濃度が室温で600ppmとなるように調整後、塩化水素ガス雰囲気中に各種サンプル3個を1日、2日及び3日の条件で曝し、それぞれの日数経過後にサンプルを取り出し、6時間以上大気中に放置後、外観検査、絶縁抵抗及び耐電圧試験を実施した。

##### ② 絶縁抵抗試験

相対湿度75%、温度23℃において第4.1図に示す電極形状で1000V絶縁抵抗計で測定した。また0.5MΩ以下はテスターで測定した。

③ 耐電圧試験

相対湿度75%、温度23℃において第4.1図に示す電極形状で直流電圧を印加して絶縁破壊電圧を測定した。



第4.1図 電極形状

(4) 耐塩化水素性試験結果

耐塩化水素性試験結果を第4.1表に示す。現状の設備で使用しているFRPの種類は、NP-RM20、NR-830、NR-3093Cであるが、塩化水素雰囲気ではNR830あるいはNP-RM20のようにCaCO<sub>3</sub>の充填されているFRPの絶縁劣化が著しいことが明らかになった。またNR3093C(充填剤; BaSO<sub>4</sub> 一部Al(OH)<sub>3</sub>)性がこの中では最も耐塩化水素が優れていることがわかった。この結果、塩化水素雰囲気での絶縁劣化対策品となり得るFRP絶縁材はNR3093C、NP-RM及びEP-Rである。

第4.1表 耐塩化水素性試験結果

供試品			絶縁抵抗 MΩ			
主成分		品名	初期	1日後	2日後	3日後
樹脂	充填剤					
不飽和ポリエステル	CaCO <sub>3</sub>	NR-830	∞	0.5~15	0.03~0.2	0.03~0.05
	BaSO <sub>4</sub> Al(OH) <sub>3</sub>	NR-3093C	∞	800~1200	150~300	150~300
	Al(OH) <sub>3</sub>	NR-300CE	∞	200~500	5~20	2~5
	CaCO <sub>3</sub>	NP-RM20	∞	10~70	1~5	0.5~1.0
	—	NP-RM	∞	1500~2000	1000	20~50
エポキシ	—	EP-R	∞	2000~3000	200~300	20~50

## 4.2 FRP表面の光電子分光分析

## (1) 光電子分光分析の目的

光電子分光分析（略称 XPSまたはESCA）は光電効果を利用して結合電子の結合エネルギーを測定し、化学種を推定するものである。表面から40Å程度の深さまで測定できる。

またエネルギー測定分解能は1eV程度である。FRP表面の光電子分光分析を行う目的は、実際に使用しているFRP絶縁材の絶縁性能劣化現象及び耐塩化水素性試験の結果に見られるようにCaCO<sub>3</sub>が充填されているものが絶縁性能劣化が顕著であった。このため光電子分光分析により、CaCO<sub>3</sub>が充填されているFRP絶縁材表面に存在する物質の化学種を同定する必要がある。

## (2) 分析試料

分析する試料は、FRP；NP-RM20（CaCO<sub>3</sub> 20%充填）であり、以下の①～③までの3検体である。①新品 ②実際の使用品 ③塩化水素テスト品

分析面積は、300×700μmである。

NP-RM20（CaCO<sub>3</sub> 20%充填）は、セルピウス装置のダイオード整流器スタック絶縁、及び交流、直流平角ブス貫通部の絶縁に使用されている。主回路絶縁抵抗低下は、この絶縁材の絶縁性能劣化が原因であったため、光電子分光分析を実施した。

## (3) 分析結果

NP-RM20（CaCO<sub>3</sub> 20%充填）の光電子分光分析によって検出された元素は①～③の通りである。また構成元素比率（Atomic %）を第4.2表に示す。

## ① 新品

新品ではC及びOのみしか検出されなかった。

## ② 実際の使用品

実際の使用品では C, O, Ca, Cl, N, Si, Sが検出された。

## ③ 塩化水素テスト品

塩化水素雰囲気に浸したものでは、C, O, Ca, Cl, Si, Alが検出された。

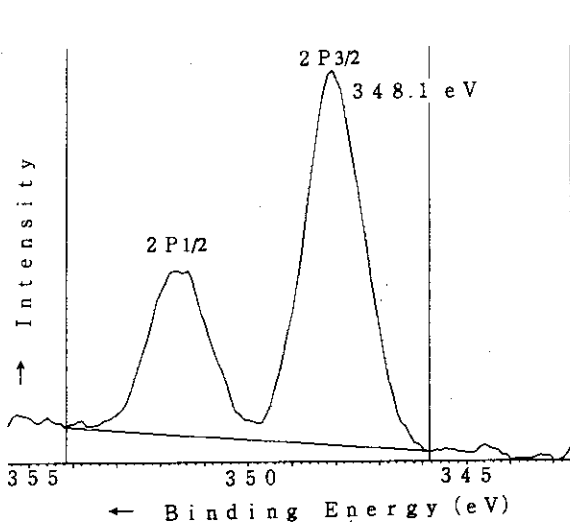
第4.2表 構成元素比率（Atomic %）

資料 \ 元素	C	O	Ca	Cl	N	Si	S	Al
新品	90.8	9.2	—	—	—	—	—	—
使用品	55.8	31.7	4.3	2.3	3.6	1.4	0.9	—
HCl テスト品	47.8	20.8	9.3	19.3	—	0.9	—	1.9

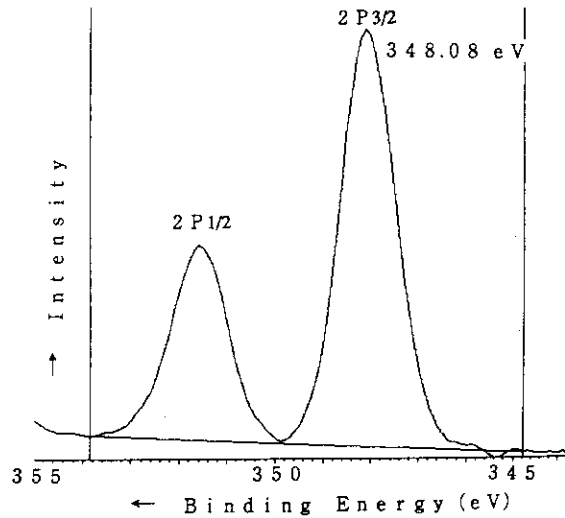


分析結果から特徴的なことは、新品ではC, Oのみが検出され、実際の使用品ではC, Oの他にCa, Cl, N, Si, Sが検出されている点である。また、塩化水素雰囲気浸したものは、C, Oの他にCa, Cl, Si, Alが検出されている。特に新品では充填剤であるCaが検出されなかったこと、実際の使用品でCaが検出された以外にCl, N, Sが検出されたこと、塩化水素雰囲気浸したものは、Ca, Clが検出されたことである。次に実際の使用品のXPSによるCaの2P電子の結合エネルギーのスペクトルを第4.2図に示す。また塩素水素テスト品のXPSによるCaの2P電子の結合エネルギーのスペクトルを第4.3図に示す。

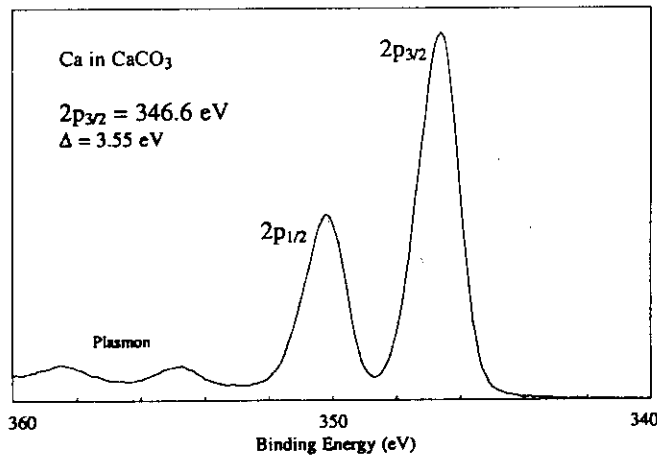
そして比較するためにXPSハンドブック<sup>(1)</sup>のCaCO<sub>3</sub>の2P電子の結合エネルギーのスペクトルを第4.4図に示す。



第4.2図 実装使用品のCaの2P電子エネルギースペクトル



第4.3図 HClテスト品のCaの2P電子エネルギースペクトル



第4.4図 XPSハンドブックによるCaCO<sub>3</sub>の2P電子エネルギースペクトル

[Perkin-Elmer「Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy」<sup>(1)</sup>より]

2P<sub>3/2</sub>電子に注目すると絶縁劣化したFRPのCaは348.10 eV (ピーク) 及び塩素雰囲気に浸したFRPのCaは348.08 eV (ピーク) で電子の結合エネルギーはほぼ同じである。そしてXPSハンドブック (Perkin-Elmer Co) によるとCaCO<sub>3</sub>は346.6 eV (ピーク)、CaCl<sub>2</sub>は348.4 eV (ピーク)、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>は348.7 eV (ピーク)、CaSO<sub>4</sub>は348.1 eV (ピーク) となっている。実際の使用品及び塩化水素テスト品の2P電子の結合エネルギーのスペクトルピークはCaCO<sub>3</sub>のスペクトルピークに対して1.5 eV大きくシフトしている。つまりこれらの分析結果から実際の使用品 (実際に使用して絶縁劣化したFRP) は、表面近傍にCaCl<sub>2</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>が存在し、また塩化水素雰囲気に浸したものでは、CaCl<sub>2</sub>が存在するものとはほぼ結論づけられる。

#### 4.3 FRP表面の化学分析

光電子分光分析に加えて、FRP絶縁板 (NP-RM20) の表面付着物質の化学分析を実施した。(原研東海研究所分析センターへ依頼)

サンプルは新品、及び使用して絶縁劣化したものの2種類である。

分析する化学種はCa、Cl等 (時間の関係もありねらいをつけてしぼった) である。

新品ではCa、Cl、NO<sub>3</sub>はほとんど検出されていないが、使用して絶縁劣化したものは、Ca、Cl、NO<sub>3</sub>が数 $\mu$ g $\sim$ 10 $\mu$ g/cm<sup>2</sup>検出された。この分析結果からも絶縁劣化したものについて、CaCl<sub>2</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の潮解性物質の存在が裏付けられた。

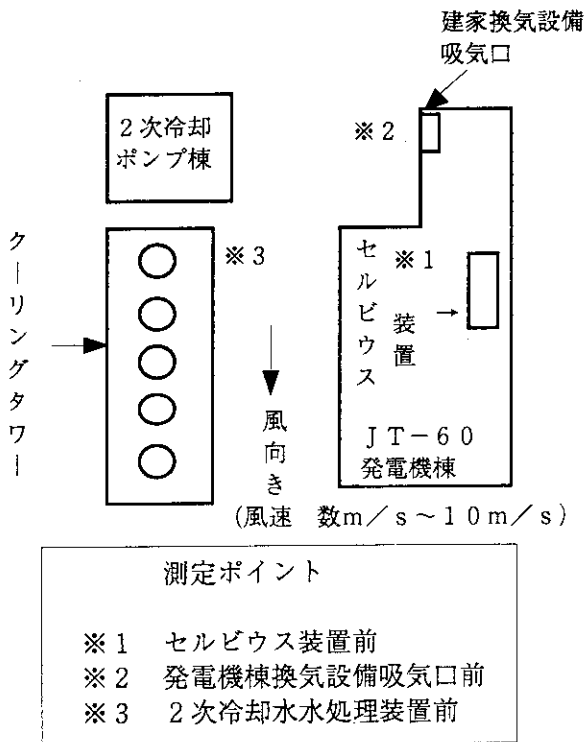
#### 4.4 環境測定

実際に使用して絶縁劣化したFRPは、表面近傍にCaCl<sub>2</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>が存在したことから、比較的近くにHCl、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の発生源があるものと考えられる。そのため環境測定を実施した。これは光電子分光分析結果から得られた結論のダメ押しのな確認の意味もある。建家配置及び環境測定個所を第4.5図に示す。図に示すように加熱用発電設備セルビウス装置はJT-60発電機棟に設置されており、その隣にJT-60 2次冷却ポンプ棟及び2次冷却塔 (クーリングタワー) がある。このクーリングタワーから蒸発あるいは飛散する冷却水はJT-60運転時は一日あたり数10 tonから150 ton程度である。2次冷却水にはスライム防止剤が使用されており、その成分は第4.3表に示す通りである。

この成分を見ると塩素イオン、硝酸イオン、硫酸イオンを形成する化学物質が含まれている。

この点を考慮して環境測定を実施した。測定ポイントは、第4.5図に示すように加熱用発電設備セルビウス装置前、JT-60発電機棟換気設備吸気口前、2次冷却水水処理装置前の3個所とした。またこの他に2次冷却水をサンプリングして分析した

このような条件下での環境測定結果を第4.4表に示す。イオンクロマトグラフによる陰イオン測定結果は各測定ポイントとも1 $\sim$ 2 ppb程度であった。風向きによっては100倍程度の濃度になる可能性も考えられる。また2次冷却水中の陰イオン測定結果を第4.5表に示す。結果は $\sim$ 数10 ppm程度であった。以上により酸性物質発生源は2次冷却塔であることがほぼ確認できた。



第4.3表 スライム防止剤成分

成分化学式	含有率
$C_4H_4NOSCl$	1.5%
$C_4H_4NOS$	1.1%
$MgCl_2$	1.1%
$MgNO_3$	2.8%
$H_2O$	94.2%

第4.5図 建家配置及び環境測定箇所

第4.4表 環境測定結果

測定ポイント	測定対象物質濃度 (ppb)				
	$Cl^-$	$NO_2^-$	$NO_3^-$	$SO_3^{2-}$	$SO_4^{2-}$
セルビウス装置前	<1.0	1.3	<1.0	<1.0	<1.0
発電機棟建家吸気口前	1.5	1.3	1.8	<1.0	1.5
2次冷却水水処理装置前	1.8	1.3	2.0	<1.0	1.6

第4.5表 2次冷却水分析結果

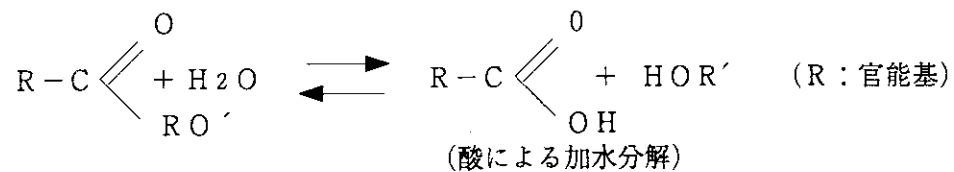
サンプル	測定対象物質濃度 (ppm)		
	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
2次冷却水	24.1	13.5	52.0

## 5. 絶縁性能劣化メカニズムの考察

絶縁性能劣化の状況、耐酸試験及び光電子分光分析結果からFRPの絶縁性能劣化のメカニズムを考察する。まず、絶縁性能劣化したFRPにCaCl<sub>2</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>が存在したことからFRPの充填剤であるCaCO<sub>3</sub>とHCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の酸性物質とが化学反応していることが推定される。しかし、新品のFRP絶縁材(NP-RM20 CaCO<sub>3</sub> 20%充填)の光電子分光分析ではCaが検出されていない。このことは、充填されているCaCO<sub>3</sub>はXPSで検出できる深さ(表面から40Å程度)よりも深いところに存在しているためであり、酸性物質がFRP内部のCaCO<sub>3</sub>と反応するには、酸性物質が不飽和ポリエステル(高分子)のチェーンを切断して侵入することが考えられる。

### 5.1 不飽和ポリエステルと酸性物質の化学反応

強化プラスチック(Vol 24 No 3)によると酸の場合、H<sup>+</sup>を触媒として加水分解反応が進行する。つまり

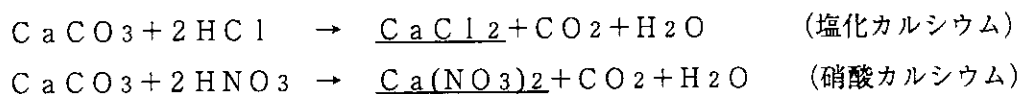


この反応により  $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C} \\ \diagdown \\ \text{O}^- \end{array}$  を生ずる。

酸と不飽和ポリエステルの反応は、可逆的であり、加水分解が奥深くで生じたとしても加水分解生成物は閉じ込められて溶出しにくいいため、再びエステル化をする。そのため絶縁性能劣化は反応生成物の溶出しやすい表面近傍に限られる。ちなみにアルカリの場合は、OH<sup>-</sup>が触媒となり不飽和ポリエステルの加水分解が進行し、酸による場合と異なり反応が不可逆的になるため、奥深くまで劣化が進展し、材料強度が低下すると報告されている(2)。

### 5.2 潮解性物質の生成

酸によりFRP高分子のチェーンが切断され、酸が侵入してFRP充填剤の炭酸カルシウムと反応し潮解性物質(塩化カルシウム、硝酸カルシウム)が生成され、高温多湿時に絶縁性能劣化をもたらす。反応式は、以下の通りである。



## 6. 絶縁性能劣化対策

先に述べたようにセルビウス装置のFRP絶縁材の絶縁性能劣化は炭酸カルシウムを充填したFRPの絶縁性能劣化が著しいことが明らかになったため、対策としては現状の環境に耐え得る新たな材質に変更することにした。4.1(4)で述べた耐塩化水素性試験結果において絶縁性能劣化の度合の小さい絶縁材を選定して交換することとした。材質を選定するに当たっては、品質と経済性を考慮した。また絶縁材の交換に併せて一部絶縁の補強も実施していた。以下に対策内容を示す。また絶縁材交換前後のセルビウス装置絶縁抵抗と相対湿度の関係を第3.1図に示す。

対策後は一桁以上絶縁抵抗が高くなっている。

### 6.1 セルビウス装置FRP絶縁材の交換

#### (1) ダイオード整流器スタック、ブス貫通部 絶縁材

NP-RM20(不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{CaCO}_3$ )をNP-RM(不飽和ポリエステル樹脂 Caフリー)に変更した

#### (2) インバータゲート回路アクセサリ絶縁

NR-830(不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{CaCO}_3$ )をNR-3093C(不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{BaSO}_4$  一部 $\text{Al}(\text{OH})_3$ )に変更した。

#### (3) サイリスタインバータスタック絶縁材

材質は交換せず、既設のNR-3093C(不飽和ポリエステル樹脂, 充填剤;  $\text{BaSO}_4$  一部 $\text{Al}(\text{OH})_3$ )を継続使用した。

### 6.2 絶縁補強

絶縁材の交換とともに一部絶縁が弱いと思われる個所があったので以下のような絶縁補強を実施した。

#### (1) ブス貫通部の二重絶縁化

セルビウス装置内部の盤間貫通部主回路母線、交流母線、サイリスタインバータ及びダイオード整流器のアームの接続はすべて裸平角導体を使用しているため、これらは絶縁板一枚で対地絶縁されており、この意味では一重絶縁と言える。このため裸平角導体と絶縁板のわずかな隙間には冷却ファンによる差圧で風が通り、導体と絶縁板に酸性物質が容易に付着し、絶縁性能劣化に至る。そのため絶縁板貫通部は、すべてマイラテープを巻いて二重絶縁とした。

#### (2) ミニ碍子の二重化

耐電圧上は問題はないが、沿面距離が短く絶縁抵抗低下につながりそうな個所のミニ碍子については碍子を追加して補強した。

## 7. まとめ

加熱用発電設備セルビウス装置のFRPの絶縁性能劣化には二つの原因があった。一つはセルビウス装置リアクトル盤の冷却が直接屋外吸気方式（吸気口から盤まで3m）であったため、塩害を受けたことによるものであった。これについては、冷却を屋内吸気方式に改造した。もう一つの原因は、絶縁材の成分と環境によるものであり、FRPの不飽和ポリエステル樹脂が、酸を触媒として加水分解が促進され、高分子のチェーンを切断し、酸及び水分が侵入し充填材である炭酸カルシウムと酸が反応して潮解性物質が生成され、吸湿して絶縁性能が劣化した。これについては炭酸カルシウムの含まない材質（NP-RM）に交換した。NP-RMを選定したのは、耐塩化水素性試験結果に見られるようにこれまで使用していたNP-RM20（炭酸カルシウム充填）の絶縁性能劣化の度合に比較して数10倍も小さいからである。絶縁材交換後は絶縁性能は一桁以上改善されている。しかし、Caを含まないFRP絶縁材であっても、環境は同じであるからFRP表面近傍の酸の触媒による加水分解はなくなる訳ではない。従って、高湿度時には高分子チェーンの切断部から表面近傍への水分の侵入が考えられ、絶縁抵抗の低下の可能性がある。しかし、耐塩化水素性試験結果にみられるように、交換したFRPは酸による絶縁性能劣化の度合は小さいのである。今後も、長期的に渡って材質変更の効果の確認を含め、様子を見る必要があるものとする。

これまでの経験から、サイリスタ変換器あるいはダイオード整流器は、環境の良いところで使用することが望ましい。絶縁が低下した場合、分解清掃がかなりの作業量になる。後々のことを考えると空調設備のある場所あるいは水冷式の変換器を使用することが望ましい。また構造的に清掃しやすい引き出しトレイ式の変換器も考慮すべきであろう。当然のことながら、材質と環境についても事前に検討しておくべきである。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり有意義なコメントをしていただいたJT-60第1試験室長木村豊秋氏、また加熱用発電設備セルビウス装置の絶縁性能劣化の原因調査、対策を実施するに当たって色々と便宜を計っていただいた宮地謙吾前グループリーダーをはじめとする電源グループの方々に心から感謝致します。さらに絶縁性能劣化調査のための依頼分析を担当されたの東海研究所分析センターの伊藤光雄氏、樋田行雄氏並びに電子分光エネルギースペクトルに関して有益な議論をしていただいたJT-60第2試験室柳生純一氏に感謝致します。

## 7. まとめ

加熱用発電設備セルビウス装置のFRPの絶縁性能劣化には二つの原因があった。一つはセルビウス装置リアクトル盤の冷却が直接屋外吸気方式（吸気口から盤まで3 m）であったため、塩害を受けたことによるものであった。これについては、冷却を屋内吸気方式に改造した。もう一つの原因は、絶縁材の成分と環境によるものであり、FRPの不飽和ポリエステル樹脂が、酸を触媒として加水分解が促進され、高分子のチェーンを切断し、酸及び水分が侵入し充填材である炭酸カルシウムと酸が反応して潮解性物質が生成され、吸湿して絶縁性能が劣化した。これについては炭酸カルシウムの含まない材質（NP-RM）に交換した。NP-RMを選定したのは、耐塩化水素性試験結果に見られるようにこれまで使用していたNP-RM20（炭酸カルシウム充填）の絶縁性能劣化の度合に比較して数10倍も小さいからである。絶縁材交換後は絶縁性能は一桁以上改善されている。しかし、Caを含まないFRP絶縁材であっても、環境は同じであるからFRP表面近傍の酸の触媒による加水分解はなくなる訳ではない。従って、高湿度時には高分子チェーンの切断部から表面近傍への水分の侵入が考えられ、絶縁抵抗の低下の可能性がある。しかし、耐塩化水素性試験結果にみられるように、交換したFRPは酸による絶縁性能劣化の度合は小さいのである。今後も、長期的に渡って材質変更の効果の確認を含め、様子を見る必要があるものと考えらる。

これまでの経験から、サイリスタ変換器あるいはダイオード整流器は、環境の良いところで使用することが望ましい。絶縁が低下した場合、分解清掃がかなりの作業量になる。後々のことを考えると空調設備のある場所あるいは水冷式の変換器を使用することが望ましい。また構造的に清掃しやすい引き出しトレイ式の変換器も考慮すべきであろう。当然のことながら、材質と環境についても事前に検討しておくべきである。

## 謝 辞

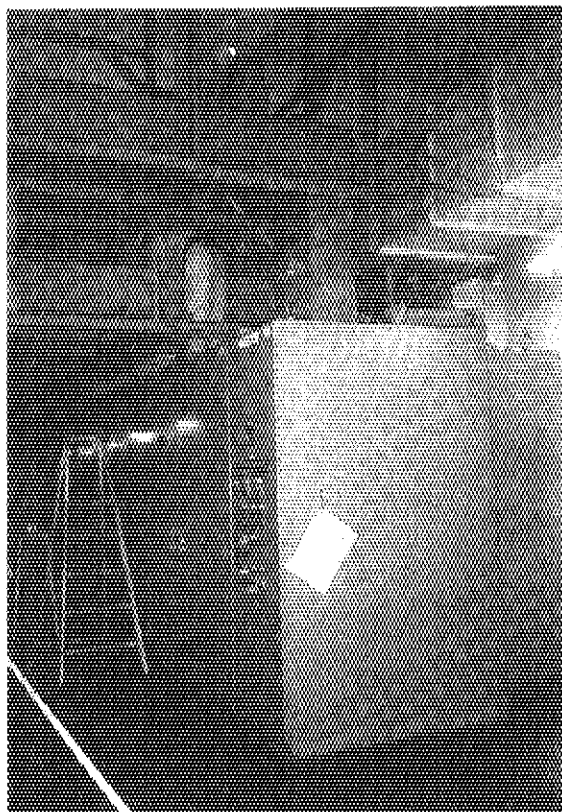
本報告をまとめるに当たり有意義なコメントをしていただいたJT-60第1試験室長木村豊秋氏、また加熱用発電設備セルビウス装置の絶縁性能劣化の原因調査、対策を実施するに当たって色々と便宜を計っていただいた宮地謙吾前グループリーダーをはじめとする電源グループの方々に心から感謝致します。さらに絶縁性能劣化調査のための依頼分析を担当されたの東海研究所分析センターの伊藤光雄氏、樋田行雄氏並びに電子分光エネルギースペクトルに関して有益な議論をしていただいたJT-60第2試験室柳生純一氏に感謝致します。

## 参考文献

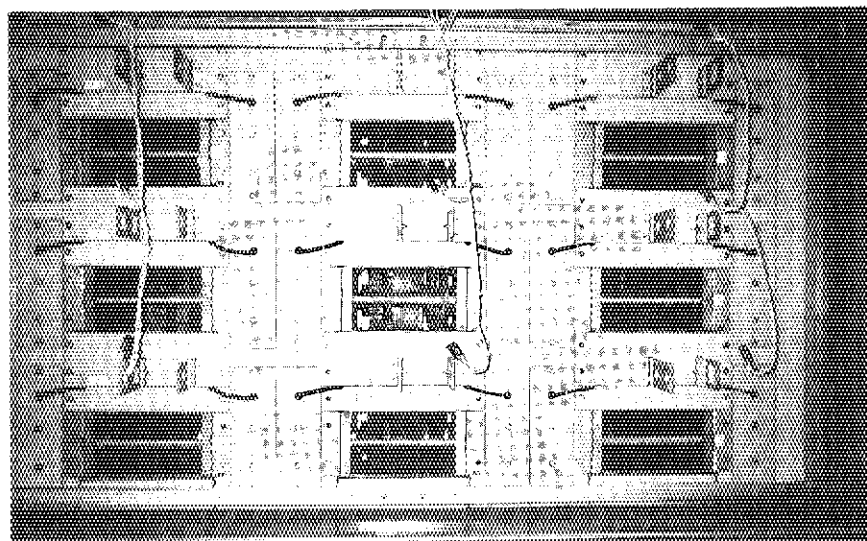
- (1) John F. Moulder etc, 「Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy」Perkin-Elmer Co (October 1992)
- (2) 北条英光、津田健、小山充彦「強化プラスチックおよび樹脂の腐食挙動と応力の影響」強化プラスチック VOL 24 NO 3 (P 32~39) 強化プラスチック協会 (1978. 3. 15)



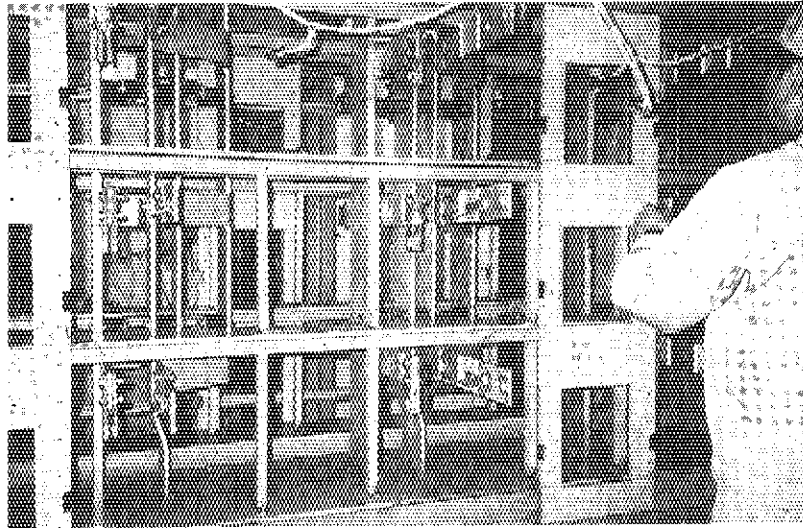
付録 JT-60加熱用発電設備セルビウス装置分解写真集



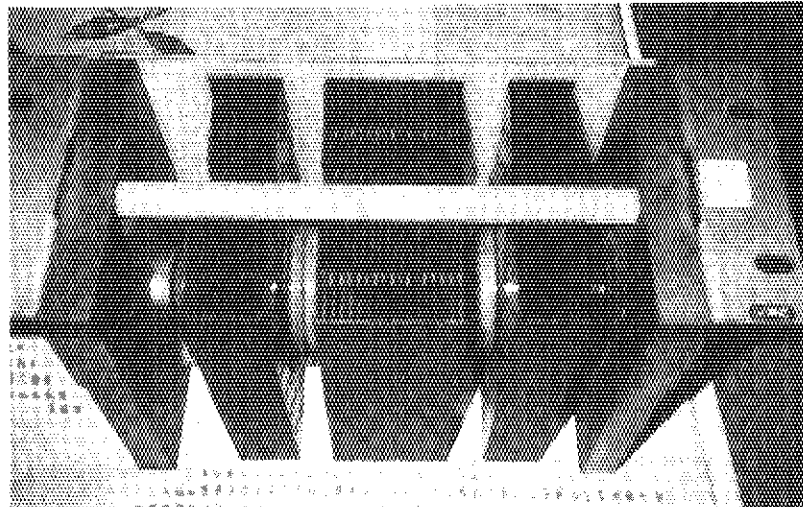
セルビウス装置外観



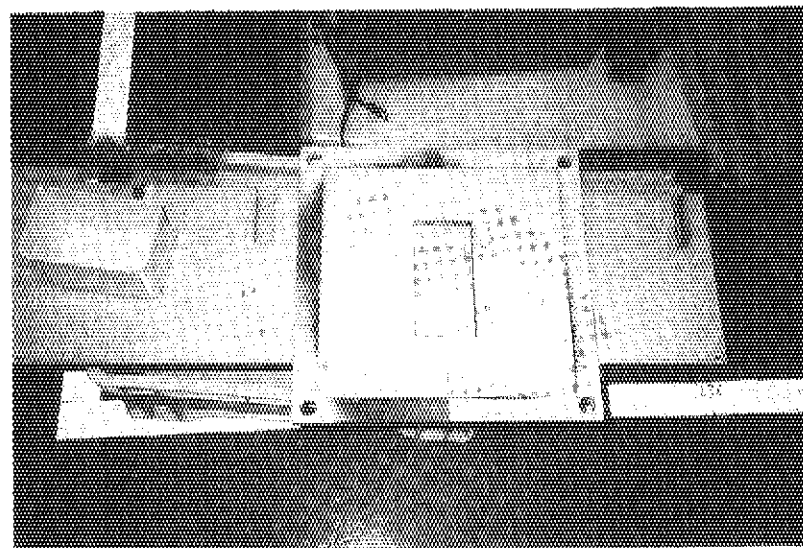
ダイオード整流器盤 (ダイオードスタック及びFRP絶縁板)



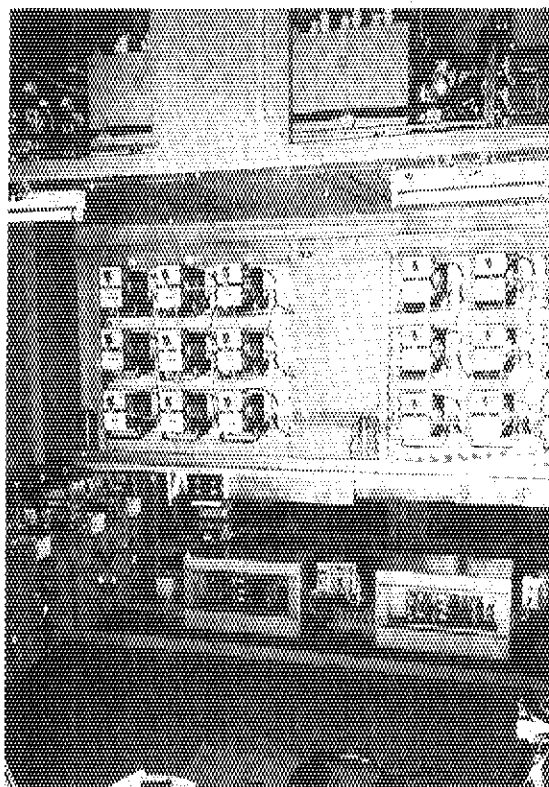
ダイオード整流器盤分解



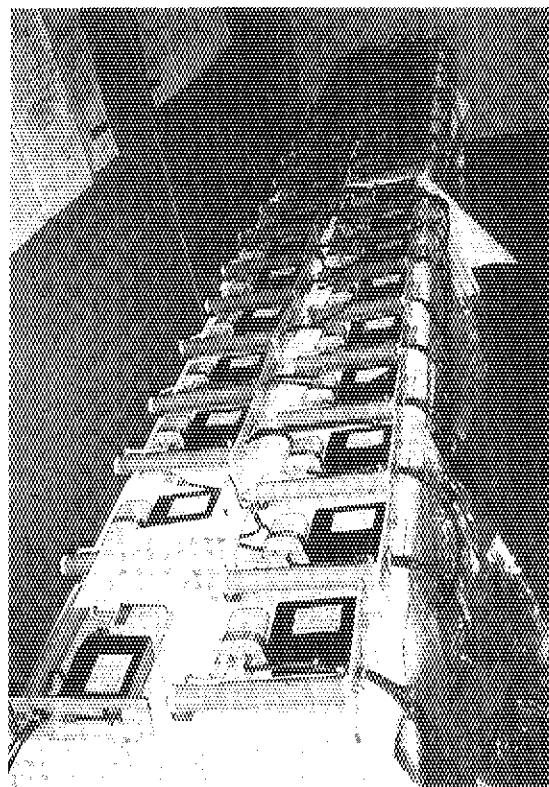
ダイオード整流器スタック



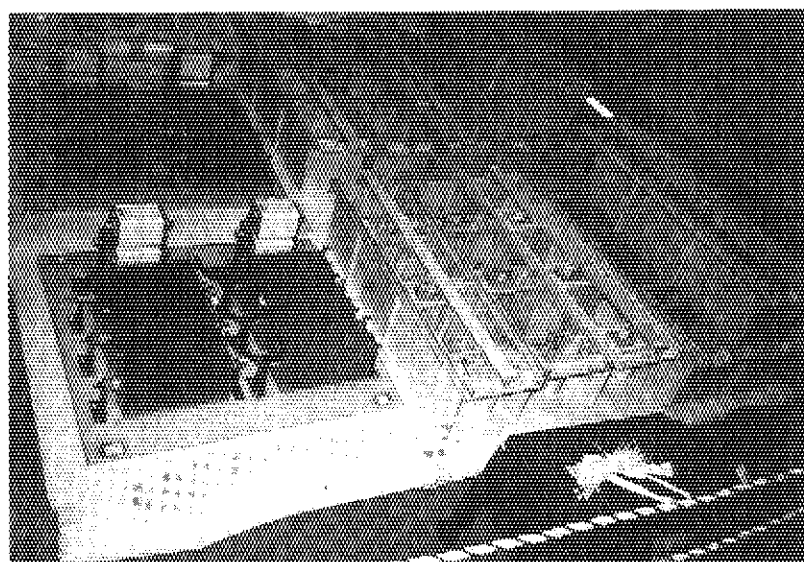
盤間母線貫通部絶縁板



サイリスタインバータ盤



インバータアクセサリ



インバータスタックボックス及びセレンアレスタ