

# 電気鉄道変電所用純水沸騰冷却式シリコン整流器

津田 信吾(つだ しんご)

中村 豊忠(なかむら とよただ)

小滝 秀治(おたき しゅうじ)

## ① まえがき

21世紀はエコロジーの時代であり、地球環境保護はわれわれの日常生活にも密接に関連した重要なテーマである。

電気鉄道は、旅客・貨物輸送部門の中でもエネルギー効率がきわめて高く、地球温暖化に直結する二酸化炭素排出原単位が最小の輸送機関である。都市圏を中心とした直流電気鉄道の電力供給の要(かなめ)である変電所用シリコン整流器は、全国で総数約2,500台、総容量約8,000 MWが稼動しており、その冷却方式はこの20年以上にわたってフロン沸騰冷却式が標準的に採用されてきた。フロン沸騰冷却式は多くの長所を持つ反面、初期に採用された冷媒であるクロロフルオロカーボン(CFC)は、1987年のモントリオール会議において、その塩素成分がオゾン層を破壊するため特定フロンとして生産が規制され、代わって採用された塩素を含まないパーフルオロカーボン(PFC)は1997年の京都会議において、SF<sub>6</sub>ガスとともに地球温暖化物質の対象となり規制されていく方向にある。

図1 純水沸騰冷却式シリコン整流器の外観



この時代の要請であるシリコン整流器の冷媒の変革という新たな課題に対し、富士電機はこのたび本質的に地球環境に負担とならない純水を冷媒とした沸騰冷却式シリコン整流器の製品化を完了し納入を開始した。以下に新型シリコン整流器について紹介する。外観を図1に示す。

## ② 電気鉄道変電所用シリコン整流器の変遷

電気鉄道は公共性がきわめて高いためにその変電機器に求められる要件は、高信頼、長寿命、省保守、高効率、不燃、小型軽量、環境適合など数多い。富士電機はこれらの要件を満たしつつ、1960年の強制風冷式シリコン整流器1号器から現在に至るまで累計800台、2,500 MW以上(海外向けを含む)のシリコン整流器をフィールドに送り出してきた。この間、整流素子の大容量化とともに冷却技術も大幅に進歩し、性能、品質、保守性が大幅に向上してきた。図2に冷却方式と冷媒およびシリコン整流素子容量の変遷を示す。

### 2.1 冷却方式と冷媒

周囲環境の影響を受けやすい初期の強制風冷式から、整流素子の信頼性向上をベースとして構成部品すべてを油中に浸漬して省保守化を図った油冷式に、さらに整流素子の大容量化に伴い、空気や油の対流熱伝達による冷却方式から、より効率的に冷却でき、不燃、省保守、小型軽量などの長所を持つ沸騰・凝縮冷却(沸騰冷却)方式に発展してきた。

冷媒も空気から鉱油、さらに沸騰・凝縮の熱伝達特性が高く電気絶縁性に優れた化学合成物質であるCFCが採用され、その後PFCに代わり、今回自然界の物質である水に回帰した。

### 2.2 シリコン整流素子

初期の1,000 V 200 A級スタッド型素子から3,000 V 3,200 A平型素子を経て、本装置で採用している国内最大級の5,000 V 3,200 A平型素子まで高電圧大容量化してき



津田 信吾

電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在、電機システムカンパニー交通・特機事業部変電技術部グループマネージャー。電気学会会員。



中村 豊忠

半導体変換装置の構造設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部課長補佐。



小滝 秀治

パワーエレクトロニクス応用製品の試験、品質保証に従事。現在、変電システム製作所品質保証部課長補佐。



に対し、容積 40 % 減、据付け面積 30 % 減を実現している。

3) 高安全性

CFC や PFC は絶縁性であるため、シリコン整流素子、電極および冷却体からなる整流スタックを冷媒に浸漬することにより容器を大地電位とすることができる。しかし水は導電性であるため、何らかの絶縁が必要となる。これを実現するために、機械的強度が高く、熱伝導性に優れ、かつ絶縁性に優れたセラミックス板をシリコン整流素子や主回路導体と冷却体との間に設けて絶縁している。これにより凝縮器を含む装置全体を大地電位とすることができ、高い安全性を実現している。セラミックス絶縁板の性能を表 1 に示す。

4) 高信頼性・省保守

部品点数の削減とセラミックス絶縁板などによる十分な絶縁性能の確保により、きわめて高い信頼性を実現している。

また、スナバとサージアブソーバ用抵抗器をシリコン整流素子と同様に沸騰冷却させるといって新しい方式を採用している。この目的は、主回路収納部の温度上昇を抑制することにより、コンパクト化とじんあいの侵入しにくい完全閉鎖構造を実現することにある。これにより集じん作用による汚損などを防止し、長期信頼性を確保するとともに点検清掃を最小化している。もちろん、従来同様補機はない。

表 1 セラミックス絶縁板の性能

物 性		セラミックス絶縁板	
一 般	密 度	g/cm <sup>3</sup>	3.3
	硬 度 (Hv)	kg/mm <sup>2</sup>	1,100
	曲げ強度	kg/mm <sup>2</sup>	30 ~ 40
熱 的	熱伝導率 (at100 )	W/mK	160
	熱膨張係数	/	4.4 × 10 <sup>-6</sup>
	最高使用温度		1,000
電氣的	体積抵抗	・ cm	> 10 <sup>14</sup>
	絶縁破壊電圧	kV/mm	15

表 2 各種冷媒の特性

冷媒の種類		純水	PFC	CFC	HFE
商 品 名			FX-3300	R-113	7200
化学式		H <sub>2</sub> O	C <sub>8</sub> F <sub>16</sub> O	C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>
沸 点 (at1気圧)		100	101	47.6	78.5
凝固点 (at1気圧)		0	- 65	- 35	- 138
比 熱		kJ/kgK	4.19	1.05	0.92
蒸発潜熱		kJ/kg	2,260	92	147
絶縁耐力 (2.54mm gap)		kV	-	41	30
オゾン層破壊係数 ODP			0	0	0.8
地球温暖化係数 GWP			0	5,000 ~ 6,000	5,000

ODP : Ozone Depletion Potential : CFC-11 の値を 1.0 とした相対値  
 GWP : Global Warming Potential : CO<sub>2</sub> の値を 1.0 とした相対値

3.2 冷媒の選定

従来の沸騰冷却式が持つ多くの長所を維持継承させることを前提とし、新冷媒の選定にあたっては以下の必要条件を中心に種々の研究および評価を行った。

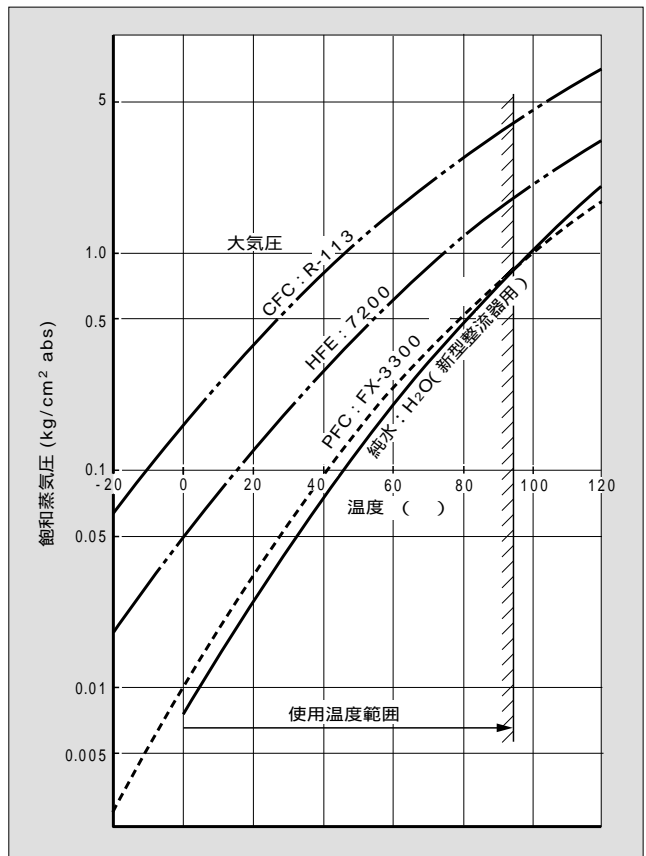
1) 環境への影響がないこと

オゾン層を破壊せず、かつ地球温暖化や環境ホルモンなどは本質的に無縁で、将来にわたって安心して使用できる物質であること。

2) 適切な温度範囲で運転でき冷却特性が優れていること

シリコン整流素子を効率よく冷却するためには、沸騰・凝縮が適切な温度範囲 (95 以下) で行われ、かつ蒸発

図 5 各種冷媒の飽和蒸気圧特性



潜熱が大きく、沸騰・凝縮熱伝達特性の高い冷媒が望ましい。各種冷媒の特性を表2に、飽和蒸気圧特性を図5に示す。

3) 長期信頼性に優れていること

冷媒と容器材料の組合せには、腐食せずかつ化学反応によって水素などの非凝縮性ガスが発生しない優れた安定性が必要である。腐食は気密漏れにつながり、非凝縮性ガスは凝縮器の有効放熱面積を狭め、冷却性能を低下させる。期待寿命まで安定した信頼性を維持するために、これらは重要なポイントである。

以上の検討の結果、「純水+銅の組合せが最適であり、添加剤（凍結防止剤など）は使用すべきでない」との結論に至った。これに伴い、凍結対策としては冷却体と凝縮器を自動運転式電熱ヒータにより加熱する方法を採用している。

なお、加速試験により容器内の純水は長期間変質しないことを確認済みである。もちろん、純水の交換や補充は不

要である。

3.3 冷却原理と構造

従来の沸騰冷却式シリコン整流器と同様に、蒸発潜熱によりシリコン整流素子を冷却する方式である。

3.3.1 冷却原理

冷却原理図を図6に示す。

1) 構成

セラミックス絶縁板で絶縁された個別冷却体を連結管で共通の凝縮器に接続し、凝縮器放熱フィンを自然冷却する。

2) 冷却

シリコン整流素子の発生熱は、冷却体へ熱伝導し、低温で沸騰が行われるよう減圧封入してある純水を沸騰させて蒸気圧を高める。蒸気は相対的に温度が低く、圧力の低い上部へ移動し、冷却されて凝縮し冷却体へ帰還する。このサイクルが繰り返されて、発生熱を低熱抵抗で効率よく空气中に放散する。スナバおよびサージアブソーバ用抵抗器も同様である。

3.3.2 構造

図7は内部構造図である。

整流器は整流スタック、凝縮器および主回路収納部から構成されている。冷却体はフレキシブルパイプを介して凝縮器下部と接続され、同パイプから下側部分およびリザーバを主回路収納部に格納している。リザーバは沸騰冷却循環をスムーズに行わせることを目的としている。

3.4 仕様・外形

新型シリコン整流器の標準仕様を表3に、外形寸法と素子構成を表4に示す。

3.5 多パルス化への対応

高調波抑制対策として、並列12パルス方式と直列12パルス方式の2種類があるが、シリコン整流素子の高電圧化に伴い寸法、質量、効率のすべてにおいて並列12パルスが有

図6 冷却原理

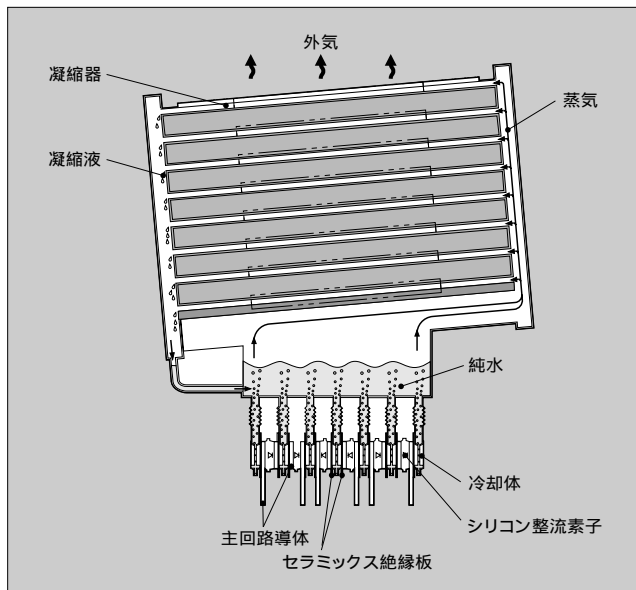
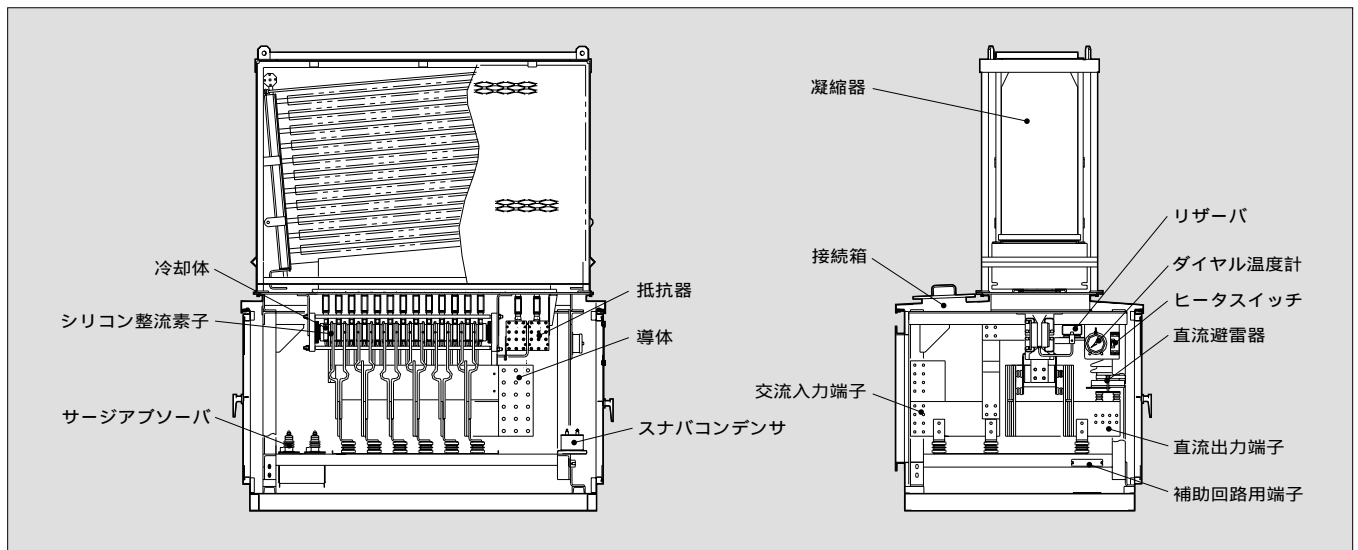


図7 内部構造図



利となるためこれを標準方式としている。

1) 高調波抑制効果の比較

図8に並列12パルスと直列12パルスの高調波実測データを示す。高調波抑制効果は同等である。

2) 相間リアクトルの省略

並列12パルスの場合、30°の位相差を持つ二組の三相ブリッジ間に流れる循環電流を抑制するために相間リアクトル

表3 標準仕様

名称	純水沸騰冷却式シリコン整流器			
設置場所	屋内または屋外			
周囲温度	屋内：0～+40，屋外：-5～+40， 屋外（寒冷地）：-10～+40			
冷却方式	沸騰自然冷却式			
適用規格	JEC-2410（1998）			
周波数	50 Hzまたは60 Hz			
定格のクラス	DまたはE			
接続の種類	三相ブリッジ（6パルス）または 二重三相ブリッジ（並列12パルス）			
直流電圧	1,500 V，750 V，600 V			
標準出力	定格出力（kW）	直流電圧（V）		
		1,500	750	600
	1,500			
	2,000			
	3,000			
	4,000			
	6,000			
直流電圧変動率	6%または8%			
補助電源	制御用：DC 100/110 V スペースヒータ用：単相AC 200 V			
塗装色	マンセル5Y7/1			

図8 高調波実測データ

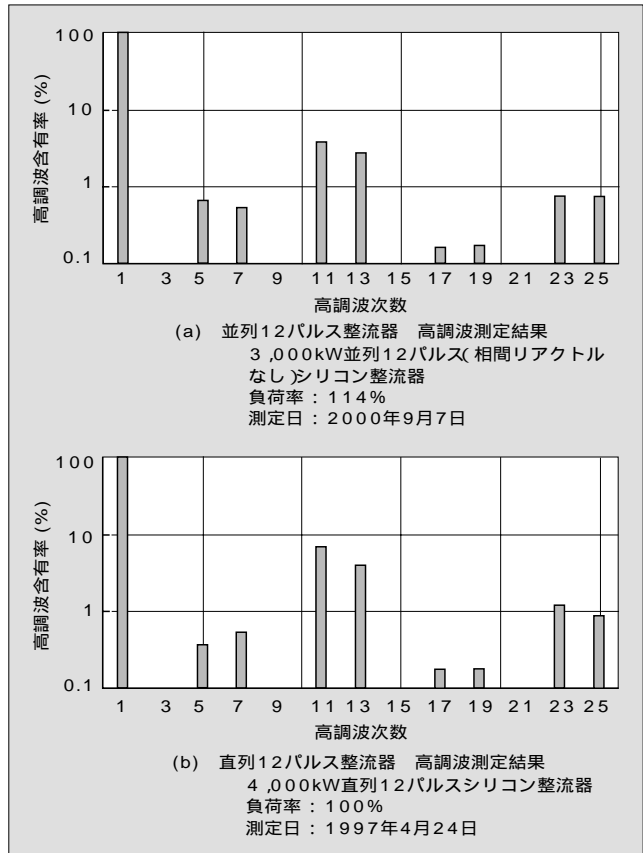


表4 外形寸法と素子構成

定格電圧 (V)	相数 (パルス)	定格出力 (kW)	定格のクラス	素子構成 (S・P・A・G)	外形寸法 (mm)			質量 (kg)
					W	D	H	
1,500	6	3,000	D	1・1・6	1,430	2,100	2,680	1,500
			E	1・1・6	1,430	2,100	2,340	1,400
		4,000	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,200
			E	1・2・6	1,430	2,100	2,340	2,000
	12	3,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	1,900
			E	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	1,900
		4,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,200
			E	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	2,000
750	6	1,500	D	1・1・6	1,430	2,100	2,680	1,500
		2,000	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,200
	12	1,500	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	1,900
		2,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,200
600	6	1,500	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,200
		2,000	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,300
	12	1,500	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,200
		2,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,300

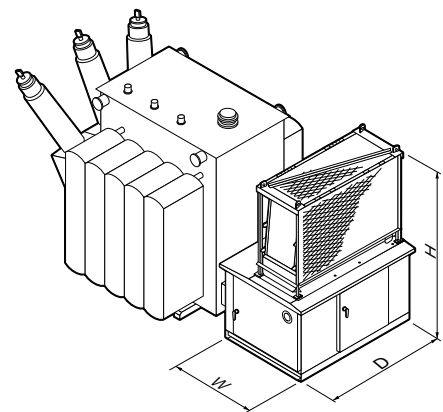
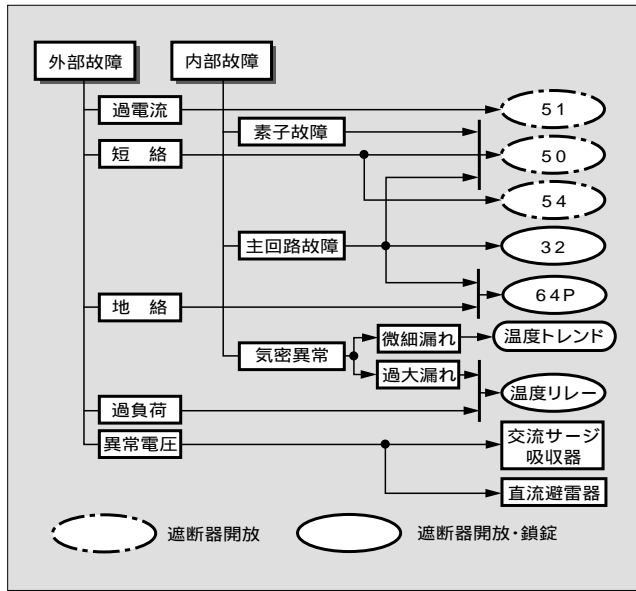


図9 保護システム



ルが必要となることがある。しかし、電気鉄道用では整流器用変圧器の巻線構造の工夫によりインピーダンスを直流側巻線に集中配置することで循環電流をまったく影響のないレベルに抑制することが可能であり、このことはフィールドでも検証している。なお、相間リアクトルを具備しない並列12パルス整流器はすでに数多くの納入実績がある。

3.6 保護システム

過電流，短絡，地絡などの外部事故と万一の内部事故に対する保護システムを図9に示す。従来の沸騰冷却式と異なる点は，密閉容器内に充電部がないため内圧上昇保護が不要となる点である。万一の微細な気密漏れは，巡視点検時に温度トレンドで発見することができる。

4 あとがき

本装置はJEC-2410（半導体電力変換装置）はもとより，旧日本国有鉄道（国鉄）規格で規定されている短絡電流耐量試験などすべての検証項目をクリアし，2000年の秋，JR各社ならびに日本鉄道建設公団の形式試験も完了した。地球環境に本質的に影響を及ぼさず，随所に独自のアイデアを結集して電気鉄道用主器として求められる要件をすべて満たした製品である。

今後とも富士電機は，地球環境保護を意識した製品開発に積極的に取り組み，ユーザー各位に提供していく所存である。

参考文献

- 1] 気候変動に関する国際連合枠組条約京都議定書（和文）. 環境庁地球温暖化対策研究会暫定訳 .
- 2] 田中滋夫ほか . 電気鉄道変電所用沸騰冷却シリコン整流器 . 富士時報 . vol.62 , no.8 , 1989 , p.567-570 .
- 3] 清水一彬ほか . 最近の電鉄変電所用整流器とその選択 . 富士時報 . vol.49 , no.5 , 1976 , p.237-243 .

解説 スナバ

スナバ（Snubber）とは元々「ショック止め具」を意味する。半導体整流素子などにおいて，素子に与えられるサージ電圧や振動性の過渡電圧を吸収するために，素子に並列に接続されたRC直列分岐回路を指す。ことに，素子内に蓄積したキャリアがスイッチング

とに逆流して生じるサージ性の電圧を回避するためのスナバは常時通電となり，この部分で生じる損失は，効率低下や過熱の原因となるので，設計者はさまざまな工夫を凝らして除去しようとする。