

# 超伝導コイル励磁用パルス電源の開発

Development of pulse power supply for superconducting coil excitation

青山 浩二<sup>※1</sup>  
Kouji Aoyama  
河合 俊哉<sup>※1</sup>  
Toshiya Kawai  
水野 秀則<sup>※1</sup>  
Hidenori Mizuno  
白井 伸明<sup>※1</sup>  
Nobuaki Shirai

## 1. はじめに

現在、核融合科学研究所殿（以下、核融合研）ではプラズマ核融合発電の実現のために様々な実験が行なわれている。核融合研の大型ヘリカル装置（以下、LHD）は、世界最大級の超伝導コイルを備えたプラズマ核融合実験装置である<sup>(1)</sup>。

当社は、このLHDの超伝導コイルを励磁する定常直流電源をすでに6システム納入しており、これらは現在順調に稼働中である。

今回、核融合研では、コイル電流を従来よりも短時間で変化させる高度なプラズマ実験を行なうこととなった。これを実現するために、従来の定常電源システムに新たに、短時間定格の大容量電源を組合せる新しい電源システムを核融合研と当社で開発した。新たに組合せられる電源を超伝導コイル励磁用パルス電源（以下、パルス電源）という。

本稿では、まずLHDを簡単に紹介し、次に新しい電源システムの概要、パルス電源の概要、試験結果等について述べる。

## 2. 大型ヘリカル装置(LHD)

### 2.1 LHDの概要

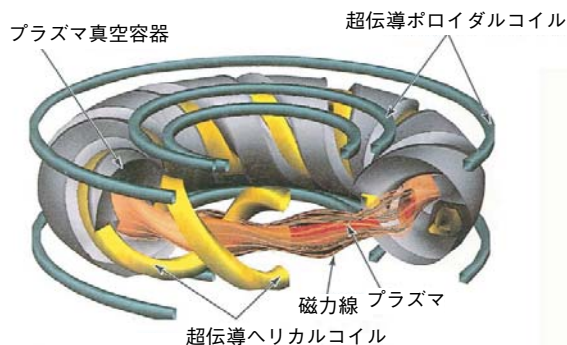
核融合発電装置で取り扱うプラズマは数千万度の超高温であるため、プラズマを閉じ込めている真空容器の壁に触れないように位置や形状を制御しなければならない。

プラズマは、電子とイオンの荷電粒子の集合であるため、磁力線に巻き付いて運動するという性質がある。トカマク型やヘリカル型の核融合実験装置では、磁力線をドーナツ状（トロイダル形状）に丸くつなぎ、さらに捻る（ヘリカル形状）ことで内側と外側の磁場の強さを一様にして、プラズマの閉じ込めを行っている。

LHDは、プラズマ真空容器、ヘリカルコイル、ポロイダルコイルで構成される本体装置と、コイルを励磁するための電源システムのほかに、プラズマを加熱するための各種加熱装置、コイルを冷却するための冷却装置、プラズマの諸量や諸現象を測定するための各種計測装置などで構成されている。LHDの本体装置を図1に、その構成諸元を表1に示す。

### 2.2 ヘリカルコイル

ヘリカルコイルは、プラズマを閉じ込めるためのヘリカ



提供元：自然科学研究機構 核融合科学研究所

図1 LHDの本体装置

表1 LHDの構成諸元

諸元	仕様
本体の外径	13.5m
ドーナツ状のプラズマの半径	3.9m
ドーナツ状のプラズマの太さ	1.0~1.2m
磁場強度	3T (テスラ)
蓄積エネルギー	0.9GJ
本体の質量	約1500t

表2 ヘリカルコイルの諸元

諸元	仕様		
	HO	HM	HI
コイル名称			
大半径	3.9m		
小半径	0.975m		
定格電流	13.0kA	13.0kA	13.0kA
質量	150t (3コイル合計)		
冷却方式	ヘリウム浸漬冷却		

ル磁場を発生させるコイルである。

一体化された3個のコイル（HO、HM、HI）で最大3Tの強磁場を作り出す。最大13kAの大電流を連続通電するため、超伝導コイルになっている。ヘリカルコイルの諸元を表2に示す。

### 2.3 ポロイダルコイル

ポロイダルコイルは、ドーナツ状のトロイダル磁場に対し直交する磁場（ポロイダル磁場）を発生させるコイルである。プラズマの断面形状や位置を制御するために使われる。3種類（OV、IS、IV）のポロイダルコイルがあり、最大で30kAの大電流を連続通電するため、ヘリカルコイル同

※1 電力事業部 新技術開発G

様に超伝導コイルになっている。主要緒元を表3に示す。

## 2.4 コイル電流と励磁電源

今回の新実験では、ポロイダルコイルを励磁するための電流を、従来よりも高速でステップ状に変化させる通電パターンがある。その通電パターンを図2に示す。

コイルは超伝導であるため、定常電流通電時にはわずかな励磁電圧で良い。しかし、電流を変化させる時には、高インダクタンスかつ大電流なので、高い電圧が必要とされる。この通電パターンを満足するコイル電源の最大出力は最大電流 ( $I_m$ ) と最大電圧 ( $V_m$ ) の積となる。必要な最大電圧 ( $V_m$ ) は短時間 ( $t_p$ ) であるが、電流は連続であるため、電源としては大きな連続出力定格となってしまう。

この問題を解決するため、高い電圧が必要とされる短時間のみに、高電圧を出力するパルス電源を既設の低電圧連続仕様の電源に直列挿入するシステムを考案した(特許出願中)。

表3 ポロイダルコイルの諸元

諸元	仕様		
	OV	IS	IV
コイル名称	OV	IS	IV
中心半径	5.55m	2.82m	1.8m
定格電流	31.3kA	21.6kA	20.8kA
質量	45t	25t	16t
冷却方式	ヘリウム強制循環冷却		

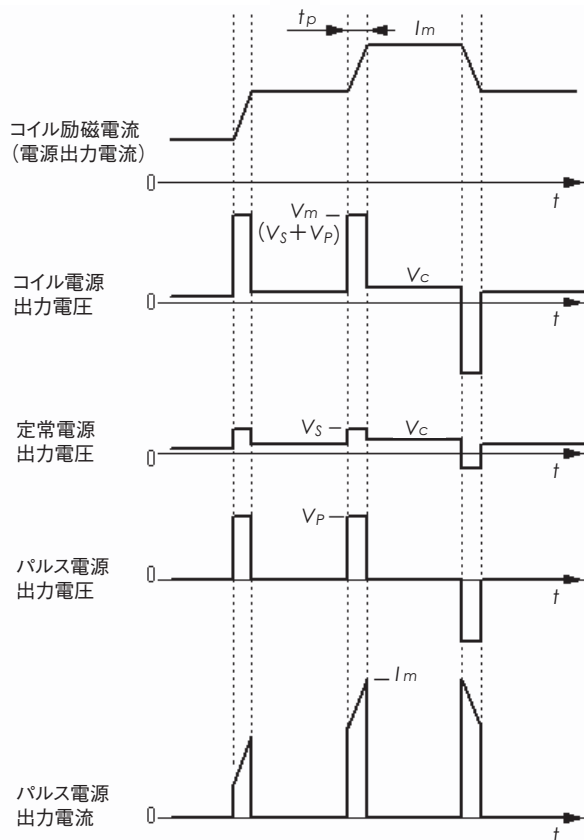


図2 ポロイダルコイル通電パターン

このパルス電源は、図2に示すように短時間 ( $t_p$ ) にしか電圧、電流を出力しないため、短時間定格で良い。これにより、最大電圧・電流を出力する連続定格の電源を新設するよりも、ずっと低コストであり、小型で大容量の電源システムが構成できることになった。

## 3. コイル励磁電源システム

### 3.1 電源システム構成

コイル励磁電源システムは、LHD制御系からの指令に従って、コイル電流を制御するシステムである。このシステムは、LHDの各コイル毎に励磁用の電源(以下、コイル電源)を備えている。コイル励磁電源システムの全体の構成図を図3に示す。各コイル電源は、各々、定常電源とクエンチ保護装置を備えている。加えて今回は、IS、IVコイル電源にパルス電源を増設した。既設の各コイル電源も当社開発によるサイリスタ電源である<sup>(2)</sup>。

クエンチ保護装置は、コイルの一部が何らかの異常により超伝導から常伝導に変わってしまった時に、コイル電流を速やかに減衰させてコイルを熱的破壊から保護する装置である。この保護装置も核融合研と当社で開発したものである<sup>(3)</sup>。

### 3.2 パルス電源の増設

今回は、ポロイダルコイル電源のうちISコイル電源、IV

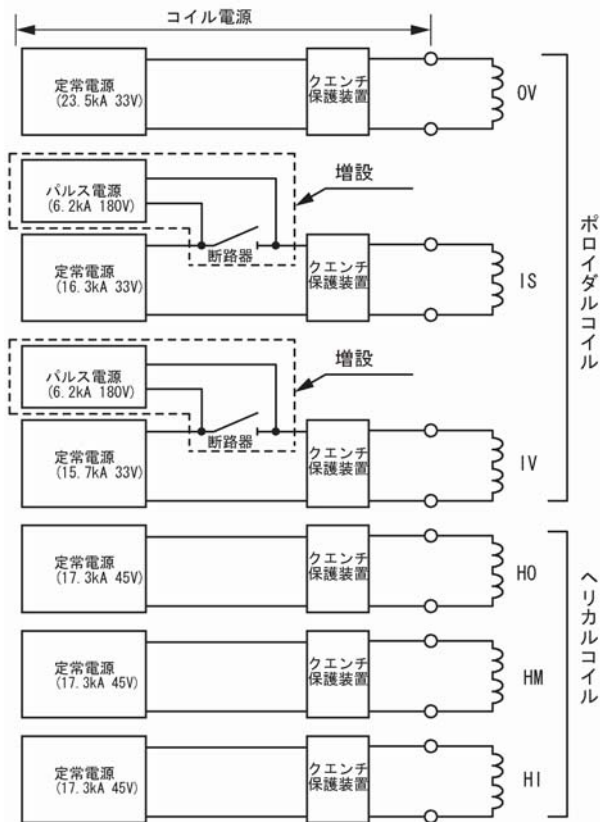


図3 コイル励磁電源システム

コイル電源にパルス電源を増設して、新しいコイル電源システムとした。前述のように、図2の通電パターンを実現しようすると大規模の電源システムが必要となる。しかし、既設のコイル電源に、短時間定格の比較的小規模のパルス電源を追加することにより、合理的な電源システムが構成できた。

既設電源への増設は、図3に示すように、電源出力回路に断路器を直列に挿入し、そこにパルス電源を接続するようにした。断路器を開極することにより、2電源を直列使用できるようになる。また、断路器を閉極したままで、従来の通電パターンによる運転も可能となる。

ただし、単純に断路器を入/切するだけでは、運転中にパルス電源を直列挿入することは不可能であるため、新たな技術開発を行なった。

### 3.3 パルス電源の基本構成と運転動作

#### (1) 基本構成

パルス電源を定常電源に直列挿入し、コイルに高い電圧を印加して電流をステップ状に立上げる運転が今回の新しい電源の特徴である。その基本構成と運転動作を図4に示す。図3の断路器とは別にダイオード(D)と開閉器(SW)を直列接続したバイパススイッチと称する回路をパルス電源の出力に設けた。パルス電源は定常電源と同様にサイリスタ制御による電源とした。

#### (2) 運転動作

基本的な運転動作は、図4に示す①～⑥の期間に分けられる。

##### 期間①

定常電源のみでの通電で、パルス電源は、サイリスタゲートの制御遅れ角を90°より大きくした(ゲートシフト)状態で待機する。

##### 期間②

パルス電源のサイリスタゲートを制御して、低い電圧(～5V程度)で通電開始する。パルス電源は、バイパススイッチに今までとは逆方向の電流を流し、零まで減少させる。ダイオードがあるためこの電流は逆転せず、コイル電流はパルス電源に移る(転流する)。

##### 期間③

バイパススイッチの開閉器を開極する。電流は零であるため接点のアークは発生しない。パルス電源は電流を制御すべく負電圧も出力するため、開閉器を開いておく必要がある。

##### 期間④

パルス電源の高電圧出力により、コイル電流を高速に変化させる期間である。図は電流増加の例であるため、パルス電源は正電圧を出力しているが、電流減少の場合、パルス電源は負電圧を出力する。

##### 期間⑤

コイル電流が所定の電流に達したら、パルス電源の出

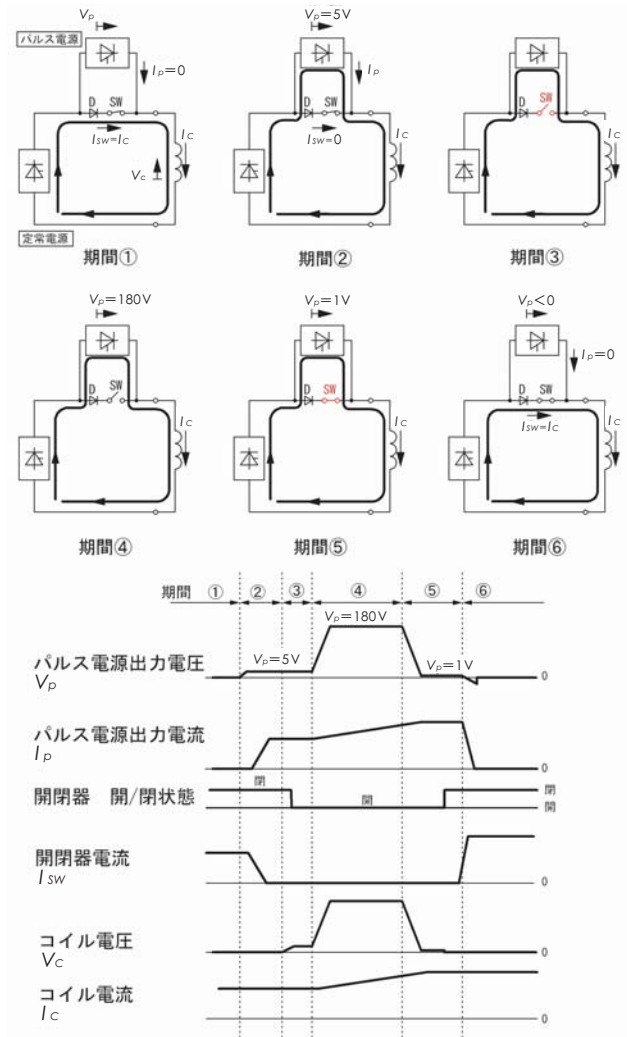


図4 パルス電源運転動作

力電圧をほぼ零(～1V程度)にする。そして開閉器を閉極する。この時点では、まだコイル電流はバイパススイッチ側に転流していない。

##### 期間⑥

パルス電源の出力電圧を負側に振って、電流をバイパススイッチに転流させる。パルス電源はゲートシフト状態で次の通電まで待機する。

以上の一連の動作により、定常電源の連続運転中に、パルス電源の直列挿入/切離が可能になった。

## 4. パルス電源の概要

### 4.1 概要

今回、パルス電源は、ポロイダルコイル電源のうちISコイル電源とIVコイル電源に追加増設した。そのコイル電源の既設を含めた単線接続図を図5に示す。図中のDS5が図3に示した断路器であり、パルス電源を使用する運転では常に開極している。図4のバイパススイッチの開閉器はDS6である。

パルス電源、定常電源ともに大容量電源として標準的なサイリスタ制御電源としている。定常電源側は連続定格なので、サイリスタや導体の多くを水冷方式としているが、パルス電源は短時間定格なので、サイリスタやダイオードは風冷とし、導体は自然冷却とした。

両パルス電源 (IS/IV) とともに同一仕様で製作した。仕様を表4に、外観を図6に示す。

## 4.2 構成

パルス電源は、図5に示すように、高圧受電部とサイリスタ変換器部、DCフィルタ部、バイパススイッチ部、制御部から構成されている。

### (1) 高圧受電部

高圧系統から6.6kVを受電し、サイリスタ変換器に交流電力を供給している。また、ここからサイリスタ制御用の同期電圧をとっている。

### (2) サイリスタ変換器部

高速応答性と出力電圧リップ低減のために、2重3相ブリッジの12相整流回路を採用した。短時間定格として小型化を図った。

表4 パルス電源仕様

項目	仕様
定格	短時間定格 最大2分通電 (運転デューティ比1/15) (バイパススイッチは連続)
入力電源	3φ 6.6kV 60Hz
電力変換方式	2重3相ブリッジサイリスタ 12相変換方式
冷却方式	強制空冷
定格出力電流	6.2kA
定格出力電圧	180V
出力電圧範囲	+180V ~ -180V
出力電圧リップル	1.8V (rms) 以下



図6 パルス電源外観 (一部)

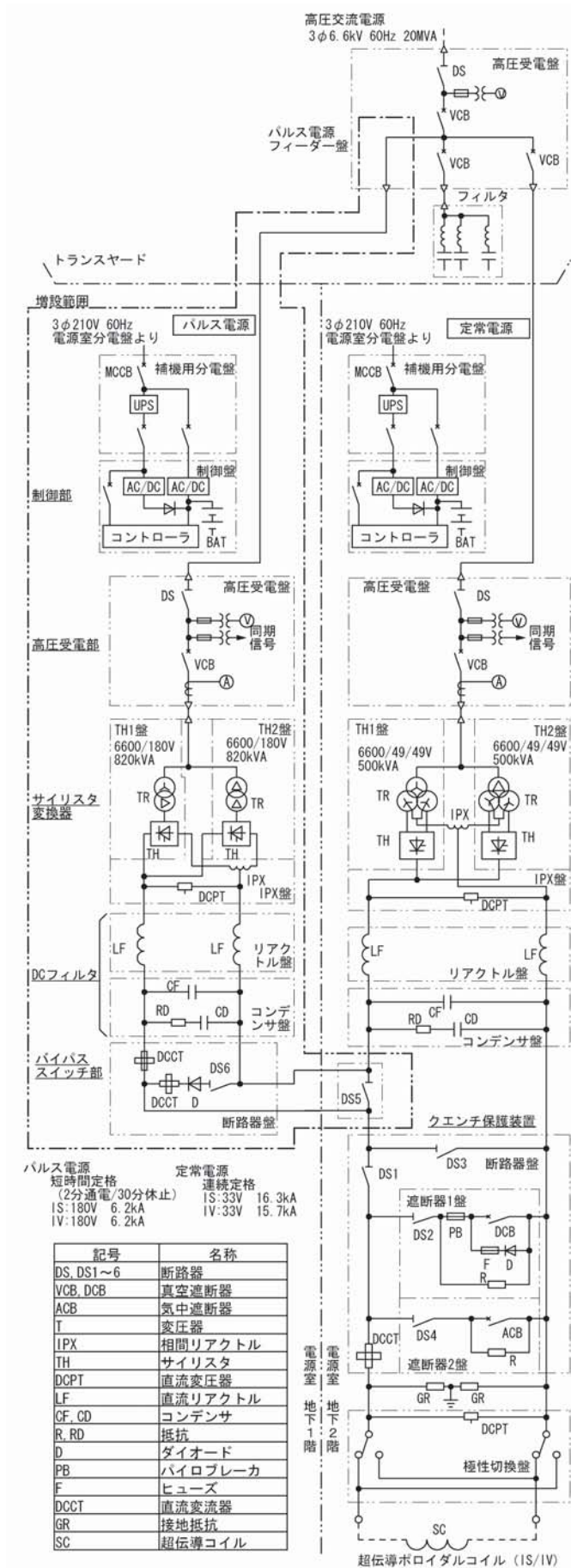


図5 IS/IVコイル電源の単線接続図

### (3) DCフィルタ部

出力電圧リップルを抑制するために、リアクトルとコンデンサで構成したDCフィルタを設けている。フィルタの共振を防止するためのダンピング回路 (RD、CD) も既設電源と同様に付加した。

### (4) バイパススイッチ部

断路器とダイオードに加えて、直流変流器 (DCCT) を接続して構成した。確実に電流零で断路器を開極させるため、直流変流器でバイパススイッチの電流を検出して、タイミング制御するようにした。また、断路器は、高速に開閉動作させるため、空圧駆動式の断路器を採用した。

パルス電源運転時以外は、定常電源の電流が連続的にバイパススイッチに流れるため、断路器は連続定格としている。また、ダイオードも、大電流が連続して流れるため、大容量の素子 (3.5kA) を6並列にして構成した。

### (5) 制御部

サイリスタ変換器では、入力交流電圧の位相に同期し、サイリスタゲートの位相を制御して、出力電圧を制御する。

既設の定常電源と同様にパルス電源についても、当社が開発した連続位相比較型 PLL を用いた各相瞬時応答型デジタル位相制御<sup>(2)</sup>を採用した。連続位相比較型 PLL は、入力電源の周波数変化に高速に追従し、かつ、入力電源の電圧歪みの影響を受けにくい。また、入力電源が停電した場合でも位相同期が継続可能なため、サイリスタの位同期方式としては最適な方式である。

今回は、従来の位相制御回路を改良して、フルデジタル化を実施した。これにより、位相制御の分解能を従来の  $0.7^\circ$  から  $0.2^\circ$  に向上させると共に小型化を図った。フルデジタル化した位相制御のブロック図を図7に、位相制御基板を図8に示す。

超伝導コイル用電源では、商用電源が停電した場合でも超伝導コイルを保護し、装置が安全に停止するまで運転制御しなければならない。このため、既設電源と同様に制御電源には無停電電源装置 (UPS) を使用し、かつバッテリー

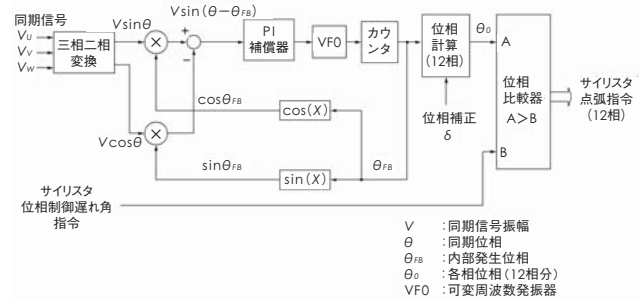


図7 フルデジタル位相制御ブロック図

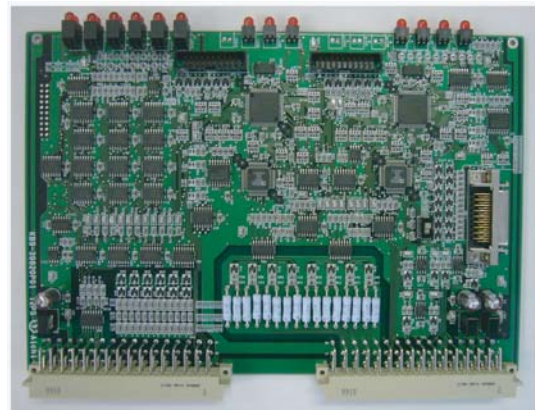


図8 フルデジタル位相制御基板

でバックアップするようにした。

## 5. パルス電源の設置

電源の配置を図9に示す。既設の定常電源は、地下2階に設置されている。パルス電源は、地下1階に設置し、設置される床は建屋の梁に鋼材を渡して補強を施した。

前述したように、パルス電源は、定常電源のコンデンサ盤と断路器盤の間に新たに断路器DS5を設置し、それと並列にパルス電源の出力を接続する。そこで、定常電源のコンデンサ盤を改造し、その盤上に断路器を設置することにした。そして、パルス電源の出力導体を地下1階の床を貫

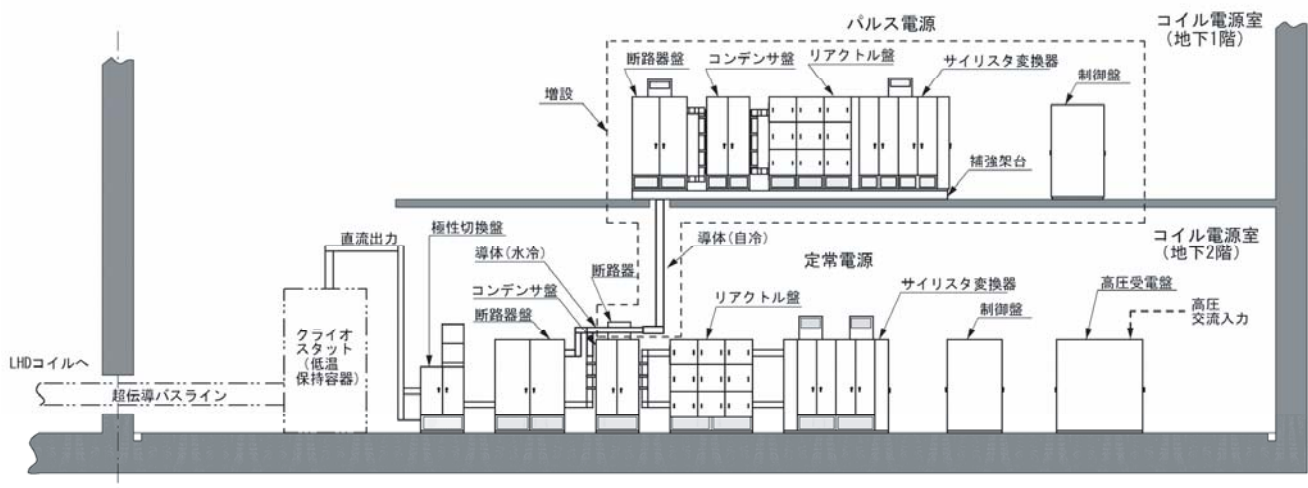


図9 電源配置

通させて断路器と接続した。断路器の設置状況を図10に示す。

定常電源は、連続定格電流が16kAと大きいため、出力導体に水冷導体を採用している。このため、断路器と、コンデンサ盤および断路器盤との接続にも水冷導体を採用した。パルス電源は、短時間定格であり、定格電流も6kA（定常電源の1/2.6）と定常電源に比べて小さいため、出力導体は自冷導体とした。

## 6. 試験結果

設置完了後に、通電試験を行なった。コイル電流を増加させる（1.85kA→2.25kA）試験の試験結果例を図11に示す。試験結果から図4と同様な動作をし、設計通りの動作が確認できている。

## 7. まとめ

核融合研向けの超伝導コイル励磁用パルス電源を開発し、ISコイル、IVコイル用の2電源を納入した。現在、核融合研では、この新しい電源システムを使用したプラズマ実験を実施しており、IS、IVコイルをはじめ他のコイル電源も含めて順調に稼動している。

当社では、このような研究所向けの大容量電源を、お客様と一体になって開発して、当社製品分野の拡大をはかっていく所存である。

## 参考文献

- (1) 三戸：「核融合研における超伝導工学研究：LHDの成果と今後の発展」日本原子力学会 核融合工学部会会報 第13号(2006)
- (2) 丹羽、佐藤、ほか：「大型超伝導コイル用電源システムの開発」愛知電機技報 No.17(1996)
- (3) 棚橋、佐藤、ほか：「超伝導コイル用30kA級直流遮断装置の開発」愛知電機技報 No.15(1994)



図10 断路器設置状況

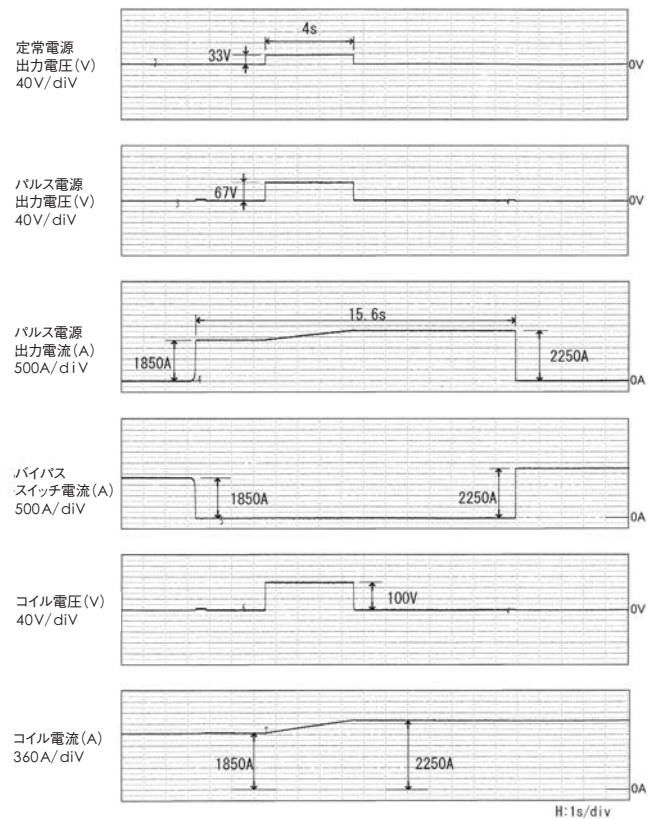


図11 パルス電源通電試験波形