

JT-60負イオンNBI加熱装置電源設備の 長パルス化改造検討

Modification of Power Supplies in the Negative-ion-based NBI System
for a 100 s Operation in JT-60 SA

薄井 勝富 能登 勝也 河合 視己人 大賀 徳道*
池田 佳隆

Katsutomi USUI, Katsuya NOTO, Mikito KAWAI, Tokumichi OHGA*
and Yoshitaka IKEDA

核融合研究開発部門
粒子ビーム加熱システム開発グループ

NBI Heating Group
Fusion Research and Development Directorate

August 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JT-60 負イオン NBI 加熱装置電源設備の長パルス化改造検討

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

トカマクシステム技術開発ユニット

薄井 勝富・能登 勝也^{*}・河合 視己人

大賀 徳道^{*}・池田 佳隆⁺

(2008 年 5 月 12 日受理)

JT-60 の超伝導化装置である JT-60SA では、負イオン NBI 装置（以下 N-NBI 装置）のビームパルス幅を現行の 30 秒から 100 秒に延ばすことが要求されている。N-NBI 装置は 1 ユニットで 2 つのイオン源を有しており、1 イオン源あたりの中性粒子ビーム入射パワーは 5.0MW、ビームエネルギーは 500keV である。長パルス化においては、既存の短パルス用電源設備を最小限の改造で 100 秒の長パルス運転を可能とすることが求められている。今回、N-NBI 装置の電源設備の 100 秒化に向けて、保護協調の観点及び主要機器の熱設計を中心に、改造が必要な箇所の抽出を行った。2003 年に実施した 30 秒化改造とその後の運転実績を基に検討を進めた。その結果、加速電源については、既設 GTO(:Gate Turn-off thyristor)と新設・追加する IEGT(:Injection Enhanced Gate Transistor)との組み合わせによる出力電圧制御方式に変更することで 100 秒化への対応が可能であることを明らかにした。5 種類の負イオン生成部電源については、ダミー抵抗器等の容量の増強や冷却能力強化により、100 秒運転についてのおおよその目途がたった。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

^{*} 出向職員（日本アドバンステクノロジー（株））

^{*} 日本アドバンステクノロジー株式会社

⁺ 経営企画部

Modification of Power Supplies in the Negative-ion-based NBI System for a 100 s Operation in JT-60 SA

Katsutomi USUI, Katsuya NOTO[※], Mikito KAWAI, Tokumichi OHGA^{*} and Yoshitaka IKEDA⁺

Division of Tokamak System Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received May 12, 2008)

The JT-60 negative ion-based NBI (N-NBI) system is required to extend the pulse duration from 30 s to 100 s in JT-60SA that is the modified JT-60U with full superconducting coils. The JT-60SA N-NBI system will have 2 ion sources, each of which will inject 5 MW at 500 keV. The present power supply system should be upgraded to operate for 100 s with minimizing the modification of existing components. The protective characteristic and thermal capacities of the power supply components were assessed based on the experience of the modification for the 30 s operation in 2003. The acceleration power supply is to be modified with combination of existing Gate Turnoff Thyristors (GTO) and Injection Enhanced Gate Transistors (IEGT) added newly. Five power supplies for a plasma production in the negative ion sources are to be modified by increasing the capacities of the partial resistance and cooling systems. These modifications can allow the long pulse operation of 100 for JT-60SA N-NBI system.

Keywords : JT-60U, NBI, JT-60SA, Protective Characteristic, Power Supply

[※] Research Staff on Loan (Nippon Advanced Technology Co.Ltd)

^{*} Nippon Advanced Technology Co.Ltd

⁺ Policy Planning and Administration Department

目 次

1. はじめに	1
2. N-NBI 装置イオン源用電源の要求性能	1
2.1 既設 N-NBI イオン源用電源	1
2.2 JT-60SA 用 N-NBI 装置イオン源用電源の要求性能	3
3. 30 秒化改造及び 100 秒化予備検討	4
3.1 30 秒化のための改造および状況	4
3.2 100 秒化予備検討	6
4. 100 秒化改造項目	17
5. まとめと今後の設計に向けた課題	19
謝辞	20
参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Specification of power supply system in N-NBI system	1
2.1 Existing power supply of N-NBI system	1
2.2 Required specifications of power supply in N-NBI system for JT-60SA	3
3. Modification for 30 s operation and assessment for 100 s operation	4
3.1 Modification for 30 s operation and results	4
3.2 Assessment for 100 s operation	6
4. Modified components for 100 s operation	17
5. Summary and remained issues	19
Acknowledgments	20
References	20

This is a blank page.

1. はじめに

JT-60U 負イオン NBI (N-NBI) 装置は、10 秒入射を定格として 1995 年 3 月末に第 1 期分の据付工事を完了し、負イオン源 1 台での調整運転を開始した。その後、第 2 期分据付工事を経て 1996 年 3 月に負イオン源 2 台による初の JT-60 へのビーム入射に成功し、現在まで約 12 年余り運転を行っている。2003 年から開始した JT-60 長時間放電実験運転に伴い、入射パルスを 30 秒に延伸することが求められた。このため既存の電源設備において、10 秒定格運転時の熱的裕度の検討を基に必要な最小限の 30 秒入射化改造を実施した。その結果、当初は 1 台のイオン源で 25 秒の入射を達成し、その後は、2 台のイオン源で入射パワー 3.2MW、21s までの安定なビーム入射に成功した。今後も、30 秒まで徐々に入射パルス幅を延伸する予定である。

一方、JT-60 を超伝導化トカマクとする JT-60SA 計画が 2007 年から開始された。この計画は、日本と欧州の 2 極間協力により進められている。JT-60SA では、ITER のサテライトトカマクとして ITER と類似のプラズマ形状で高加熱実験を行い、ITER へ科学的知見を提供するとともに、原型炉に必要な高出力密度連続運転法の開発を行う。このため、負イオン NBI 加熱装置 (以下 N-NBI 装置) では、10MW ビームを入射することが要求されており、正イオン NBI 加熱装置 (以下 P-NBI 装置) の 24MW (12 ユニット) と合わせて、合計 34MW の中性粒子ビームを設計値より 10 倍長いパルス幅 (100 秒) で入射することが要求されている。100 秒化に向けては、現行機器の熱設計、性能の再評価を踏まえた上で、既存設備を最大限有効利用することが求められており、これに基づき N-NBI 装置の中核設備である電源の改造について検討した。本報告書は、N-NBI 装置の中核設備である電源の 100 秒化に向けた改造・検討結果を纏めたものである。本検討では、これまでの 30 秒化改造での熱設計や JT-60 長時間放電実験時の温度監視結果を整理するとともに、そこから明らかになった 100 秒化改造項目を紹介する。2 章では、100 秒化に必要な電源設備の仕様を述べる。3 章では、30 秒化改造及び 100 秒化予備検討結果を述べる。4 章では、100 秒化改造項目を述べる。5 章には、まとめと今後の詳細設計に向けた課題を整理する。

2. N-NBI 装置イオン源用電源の要求性能

JT-60SA では、2 台のイオン源を用いて、10MW 重水素中性粒子ビームを 100 秒間入射する必要がある。既存の N-NBI の電源設備は 10MW、10 秒入射を目的に設計・製作されているため、100 秒化する必要がある。加えて、繰返し率も現在の 1/60 から 1/30 に小さくする必要がある。

2.1 既設 N-NBI イオン源用電源

負イオン NBI (N-NBI 装置) 用イオン源用電源 (偏向コイル電源及びガス導入系も含む) は、負イオン生成部電源、負イオンをプラズマから引き出すための引出電源、負イオンを 500 keV まで加速するための加速電源で構成されている。また、これらの電源から負イオン源への電力は SF₆ ガス絶縁のケーブルダクトで伝送・供給される。

負イオン生成部電源は、フィラメント電源、アーク電源、バイアス電源及び PG フィルター電源から構成されている。

- ① フィラメント電源及びアーク電源はアークチャンバー内にソースプラズマを生成するためのものである。
- ② バイアス電源はソースプラズマから負イオンと同時に引き出される電子を抑制するためのものである。
- ③ PG フィルター電源はプラズマ電極自身に電流を流して、アークチャンバー及び加速器内に横磁場（フィルタ磁場）を作り、アークチャンバーから負イオンとともに引き出される電子の抑制や加速器内部で発生した剥離電子の加速を抑制するものである。
- ④ 引出電源は、アークチャンバーより負イオンを引き出すための電源である。引き出されるビームエネルギーは最大 10keV である。

負イオン生成部電源、引出電源は各イオン源毎に 1 式ずつ設けられており、加速電源出力電位に電位固定された高電位テーブル上に設置されている。

加速電源は、最大 10 keV で引き出された負イオンビームを最終的に 500 keV まで加速するための電源である。加速電源は 3 つの直流電源を 3 段に積み重ねたものである。それぞれの電源は、引出電極－第 1 加速電極、第 1 加速電極－第 2 加速電極、第 2 加速電極－接地電極間に、それぞれに同一の電位差（163kV）を与える。加速電源からの高電圧は SF₆ ガスダクトを介して負イオン源へ供給されている。

偏向コイル電源は、中性化されなかった正・負イオンを偏向し、ビームダンプへ導くものであり、1 対の空心コイルに電流を給電する。

加速電源及び受配電設備は、それぞれ N-NBI 電源室およびトランスヤードに設置されている。

図-1 に既設の N-NBI 装置の電源回路図、図-2 に加速電源の写真、表-1 に既設 N-NBI 装置の電源諸元を示す。

表-1 既設 N-NBI 装置イオン源用電源の基本性能

電 源	最大出力電圧	最大出力電流	最大パルス幅	繰返し率
加速電源出力	-490 kV	64 A	10 秒	1/60 以下 ビームパルス基準
第 2 加速出力	-326 kV	20 A		
第 1 加速出力	-163 kV	10 A		
引出電源	-10 kV	80 A	10 秒	
アーク電源	120 V	5000 A	11 秒	
フィラメント電源	15 V	9600 A	16 秒	
バイアス電源	10 V	1600 A	11 秒	
PG フィルター電源	5 V	10 kA	11 秒	
偏向コイル電源	1220 V	1500 A	13 秒	

2.2 JT-60SA 用 N-NBI 装置イオン源用電源の要求性能

JT-60SA 用 N-NBI 装置の要求性能は以下の通り。

ビームエネルギー	: 500 keV
入射パワー	: 10 MW
最大パルス幅	: 100 秒
デューティサイクル	: 1/30

JT-60SA のためには、イオン源用電源の運転可能パルス幅を 100 秒にする改造が必要である。但し、ビームの立ち上がり時間やイオン源加速部でのブレークダウンに対する加速電流遮断時間等、基本的な制御方式は既設のままとし変更はしないものとする。

表-2 に 100 秒化改造後の JT-60SA 用 N-NBI 装置イオン源用電源の基本性能を示す。

表-2 改造後の JT-60SA 用 N-NBI 装置イオン源用電源の基本性能

電 源	最大出力電圧	最大出力電流	最大パルス幅	繰返し率
加速電源出力	-490 kV	64 A	100 秒	1/30 以下 ビームパルス基準
第 2 加速出力	-326 kV	20 A		
第 1 加速出力	-163 kV	10 A		
引出電源	-10 kV	80 A	100 秒	
アーク電源	150 V	3500 A	101 秒	
フィラメント電源	13 V	8000 A	106 秒	
ハイアス電源	2 V	500 A	101 秒	
PG フィルター電源	5.5 V	6.8 kA	101 秒	
偏向コイル電源	350 V	850 A	103 秒	

3. 30 秒化改造及び 100 秒化予備検討

N-NBI 装置の電源容量は非常に大きいので、P-NBI 装置のような模擬負荷抵抗器を用いて 100 秒の通電確認試験は不可能である。このため、既設電源の 100 秒化の検討は 2003 年から進めている 30 秒化改造の結果をもとに進めた。つまり、長パルス運転時の各機器の温度上昇を評価し、各機器の健全性を段階的に確認している。この章では、現在進行している最大 30 秒までの運転における各機器の状況を示すとともに、この結果をもとに検討した 100 秒化に必要な改造項目について述べる。

3.1 30 秒化のための改造および状況

30 秒化を行うに当たっては、最小の改造で、最大のビームパワーを得るために、建設当初の設計計算書や保護協調曲線図を基に、10 秒定格運転時と 30 秒通電時の熱量の比較検討を行った。具体的には、主回路に直列に接続している機器についてはビーム出力のための直流電流がパルス幅だけ流れることから、 I^2t 、並列接続機器は印加電圧とパルス幅によって決まるので V^2t の値を 10 秒通電時と、30 秒通電時で比較を行った。その結果、加速電源のブリーダ抵抗器に強制空冷ファンを追加するとともに、引出電源の GTO 用ゲートユニットのオンゲート回路用抵抗器の容量を増大するだけで、イオン源 1 台当たり 2.0MW の入射が可能であることが分かった。そこで、これらの改造を実施するとともに、主要機器の I^2t 及び V^2t を監視する保護検出システムを新たに導入し、各電源の過負荷運転を防止している。保護検出レベルは、表 3 に示すように、各電源の出力上限値を以て決定した。

表-3 30 秒化改造後の運転上限値(目標入射パワー2.0MW/イオン源、パルス幅 30 秒)

電 源	最大出力電圧	最大出力電流	最大パルス幅	繰返し率
加速電源出力	-360 kV	36 A	30 秒	1/60 以下 ビームパルス基準
引出電源	-6 kV	32 A	30 秒	
アーク電源	110 V	2800 A	31 秒	
フィラメント電源	13.5 V	7000 A	36 秒	
バイアス電源	2 V	205 A	31 秒	
PG フィルター電源	5 V	6.7 kA	31 秒	
偏向コイル電源	250 V	700 A	33 秒	

このように、30 秒化に関しては改造を必要最小限にとどめ、30 秒運転を実現させるとの方針で進めた。併せて、主要機器に関しては、JT-60 における実際の運転においては、サーモラベルによる温度監視を行った。サーモラベルは、測定範囲 40～60℃、75～95℃及び 100～120℃の 3 種類で、非可逆性のタイプを用いた。図-3 及び 4 にサーモラベル貼付箇所を示す。表-4、5 にサーモラベルによる温度監視結果を示す。

表-4 N-NBI 電源系設備サーモラベル温度監視結果（加速電源及びソース電源）

電源	改造対象機器	仕様	最高使用温度	温度(℃)
加速	コンバータ盤 相間リアクトル	LR1 0.5mH-7500A	H 種 : 180℃	40℃以下
	インバータ盤 GTO スナバ-抵抗器	RS 15Ω・2.3kW	抵抗器 : 150℃	40℃以下
	/AC リアクトル	180μ H-960A	リアクトル : 180℃	
	フリア-抵抗器(500kΩ)	型式 WMC-250W-71.4kΩ (10P×14S/段)×5 段	最高表面温度 300℃	90℃
	DC リアクトル(DCL 3mH)	OC ケーブル 6.6kV 22mm ² 屋外用ポリエチレン絶縁電線	最高使用温度 90℃	40℃以下
引出	ダミー抵抗器(R9)	ホ-ロ-被膜抵抗器 RWH120V (100W ,3kΩ×16S)	使用温度範囲 -55～200℃ 最高表面温度 : 350℃	40℃以下
	ダイオ-ド(D1)	型式 S60FHN10 1000V,60A(53S-1P-6A)	接合部温度 150℃	40℃以下
アーク	サイリスタ	型式 HW-4C SF1500U1D20 1600V 1500A	フィン許容温度 110℃	40℃以下
	ダイオ-ド(D1A/B)	型式 70MA100 1000V,250A(1S-12P-3A)	定格電流 250A ⇒ケース温度 74℃	40℃以下
	ダミー抵抗器(R3)	ホ-ロ-巻線抵抗器 2mm φ 43T(500W ,2Ω×12S)	最高使用温度 200℃	80℃
フィラメント	ダイオ-ド(D1A/B-1～8)	型式 70MA20 200V,250A	定格電流 250A ⇒ケース温度 74℃	40℃以下
	ダミー抵抗器(R3-1)	ホ-ロ-抵抗器 2mm φ 43T(500W ,2Ω×2S)	最高使用温度 200℃	50℃
ハイアス	ダミー抵抗器(R3)	ホ-ロ-抵抗器 2mm φ 43T(500W ,2Ω×1S)	最高使用温度 200℃	40℃以下
PG フィルタ	ダミー抵抗器(R3)	ホ-ロ-抵抗器 2mm φ 43T(500W ,2Ω×2P)	最高使用温度 200℃	40℃以下

表-5 N-NBI 電源系設備サーモラベル温度監視結果（偏向コイル及び特高盤）

電源	改造対象機器	仕様	最高使用温度	温度(℃)
偏向コイル	スナバー抵抗器(Rs1,2)	難燃性塗料抵抗器 CRH500V, 300Ω	使用温度範囲 -55～200℃ 最高表面温度：350℃	40℃以下
	ダミー抵抗器(Rd1,2)	難燃性塗料抵抗器 型式； Rd1 CRH500V,75Ω Rd2 CRH500V,150Ω	使用温度範囲 -55～200℃ 最高表面温度：350℃	40℃以下
特高盤	真空遮断器(89TN,52AN)	碍子引出導体部	180℃	40℃以下
	AC リアクトル	OC ケーブル 6.6kV 100mm ²	90℃	40℃以下

現時点までの最長ビームパルス幅は、加速電圧 295kV、加速電流 10.9A の時に得られており、約 27 秒であった。この時の各電源に並列接続されているダミー抵抗器の温度上昇を確認した結果、加速電源ブリーダ抵抗器は約 90℃まで上昇しており、500kV, 64A, 100 秒通電時に使用温度を超えることが予想されるため、抵抗器の容量増加が必要となることが分かった。また、アーク電源およびフィラメント電源のダミー抵抗器は各々 80℃及び 50℃まで上昇していた。その他の電源機器については、目立った温度上昇は確認されていない。今後はビームパルス幅をさらに 30 秒まで延伸し、温度上昇を把握する予定である。温度監視方法についても、サーモラベルに加え新たに赤外カメラを用いて、より精度の高い温度測定を目指すと共に、温度上昇の時間変化をトレンドデータとして取得する予定である。

3.2 100 秒化予備検討

これまでの 30 秒化改造後の検討結果及び運転実績を踏まえ、100 秒化改造の予備検討を実施したところ、各電源において大幅な改造が必要であることが判った。特に加速電源は、従来の GTO (Gate Turn-Off thyristor) の単独制御方式から、既設 GTO (Gate Turn-Off thyristor) と新設する IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor：電子注入促進型トランジスタ)インバータとの組合せによる出力電圧制御方式に変更する。これは、既設 GTO インバータは短時間定格で製作したため、長パルス運転には対応できないためである。一方、長パルス運転に対応できる容量の大きなインバータに全て交換するとコストが過大となる。そこで、図 5 に示すように、3 台ある加速電源の系統ごとに、3 台の IEGT を増設・並列接続し、各スイッチ素子の 1 台あたりの電流値を抑える。IEGT を使用する理由は、既設 GTO が既に製造中止となり、新規に製作することが不可能なためである。但し、IEGT のスイッチング速度が GTO のそれと異なるため、並列接続すると IEGT 動作時の高次モードが GTO の動作を阻害する可能性があるため、本方式の実現に向けて、スイッチング時間の調整を行うための調整試験を実施する予定である。また、これら新設 IEGT を格納するための建屋は、既設インバータ棟に隣接して新たに建設する予定である。一方、負イオン生成部電源関係については、加速電源と比較すると軽微な改造で 100 秒運転が実現可能であることが判った。ただし、今後の 30 秒通電時の各機器の温度上昇測定試験の

結果及び今後の更なる検討結果を基に、適時見直しを行い、最終的な改造仕様は、2010 年までに決定する予定である。

各電源の 100 秒化改造については、既設設備の製作メーカからの検討結果を元に、原子力機構での運転実績を踏まえて評価した。以下に各電源においての検討結果を示す。具体的には、30 秒運転実績から 100 秒に拡張した場合の温度上昇を外挿し、その値が許容範囲であるかを判断した。

(1)加速電源

①特高受電盤真空遮断器(89TN、52AN)

真空遮断器の定格は、24kV、1200A 連続である。ただし、断路部の熱容量を考慮すると、発電機受電部で、2400A、10s、Duty1/60 で使用している実績があり、30 秒化改造では、4MW（加速電圧 360kV、加速電流 36A）入射に必要となる受電容量は最大約 27MVA である。この時、真空遮断器の最大電流は約 870A であり、定格電流 1200A より低いので、30 秒運転は可能である。しかし、100 秒、10MW 入射の時の真空遮断器の電流値は約 2000A であり、定格電流を超える。また、この時の真空遮断器断路部である碍子引出導体部の温度は使用温度の上限値 180℃を超える可能性がある。以上の理由により、100 秒、10MW 入射のためには、容量の大きな遮断器に交換する必要がある。また、既設遮断器盤への組込みの観点から、新設する遮断器の外形寸法は既設のものと同等にする必要がある。

②加速電源降圧変圧器(TRA)

降圧変圧器の定格は、62.2MVA、18kV/3.12kV×2、10 秒、Duty1/60 である。

Duty1/60、100 秒運転での巻線の温度は 45℃であり、使用最大温度（55℃）を超えないと予想できる。また、Duty1/30、100 秒運転においても、詳細に温度を評価した結果、100 秒運転時の温度も最大上限値を超えないため、100 秒運転は可能である。

③コンバータ盤(ACON)

定格は、40MW、2830V、14.1kA、10 秒、Duty1/60 である。

図-6 加速電源保護協調曲線図から、30 秒運転(36A×30s)は可能であったが、100 秒運転では、温度上昇が最も厳しいサイリスタ素子のジャンクション温度は、上限値(120℃)を超える可能性がある。これは、周辺のスナバー抵抗器等が温度上昇し、サイリスタ素子が設置されている盤内の温度が設計許容温度(40℃)を超えるためである。これらの理由により、サイリスタスタックのフィンに当てる風量を増やし、冷却効果を上げる必要がある。具体的な改造は以下の通りである。

- ・ 盤内ファン風量増加
- ・ 風量増加用バリア追加
- ・ 主回路 PN ブスサイズ変更
- ・ リアクトル盤新設
- ・ PG（パルスジェネレータ）盤制御回路変更

④インバータ盤(AINV)

定格は、AC2286V、AC640A、150Hz、10 秒、Duty1/60 である。

図-6 加速電源保護協調曲線図から、30 秒運転(加速電流：36A×30s)は可能であった。既設 GTO 素子の使用温度の上限値は 115℃であり、現状のシステムで定格運転（加速電流：64A）をする

と、最大運転時間は 50 秒に制限される。このため、新規 IEGT を 9 個追加して各素子の 1 台あたりの電流値を現在の値の約半分まで低減することによって、定格での 100 秒運転を実現する。

- ・ IEGT インバータ盤 (9 面) 増設
- ・ コンデンサ盤 (3 面) 新設

⑤変圧整流器(TRF)

定格は、13.3MVA、2286V/146.4kV、10 秒、Duty1/60 である。

- ・ 昇圧変圧器

本変圧器は、定格(64A×100s)でも 100 秒運転が可能である。

- ・ ダイオード整流器

ダイオードの最大絶対定格温度は 150℃以下であ、30 秒運転は使用可能であったが、100 秒運転では、この温度を定格温度を大きく上回り使用できないため、新規のダイオードに交換する。100 秒運転時のダイオードの温度を最大絶対定格温度より下げるために、素子構成を 2 並列、或いは 4 並列とする。前者を採用すると、既存のダイオード用タンクを再利用することはできるが、タンク内の SF₆ ガスの冷却装置が必要となる。後者については、現状の大きさに納めることが困難のため、タンクの新規製作が必要となる。両者のどちらを選択するかは、今後のコストを含めた詳細設計により決定する予定である。

⑥過電圧抑制コンデンサ

定格は、(DC50kV,0.72μF)×(4S-2P)×3 セット、内部放電抵抗 40MΩ、10 秒、Duty1/60 である。10 秒運転時の温度上昇は 1.2℃であり、これから 100 秒運転時の温度上昇(内部放電抵抗(40MΩ))は 12.3℃であると見積もれる。繰り返し運転時の休止時間中に上昇した温度は、ベース値に戻ると予測される。また、抵抗器及び絶縁油の使用上限温度は 125℃及び 105℃以下であり、100 秒運転は可能であると予想される。確認のために、サーモラベルを用いて、運転中の温度監視を実施する。

⑦過電圧抑制コンデンサ保護装置

- ・ 制動抵抗器

定格は、170Ω、383Ω×(2S-9P)×2 ユニット、10 秒、Duty1/60 である。

30 秒運転での温度上昇は 38.1℃であり、周囲温度(40℃)を考慮すると、最大温度は 78.1℃であり、最高使用温度 230℃以下であった。この実測結果から、100 秒運転の温度上昇を見積もると、116℃と推定でき、最高使用温度以下のため問題はない。

- ・ 限流抵抗器(400kV 回路用、200kV 回路用)

定格は、400kV 回路用 100Ω、20A (通電電流)、300Ω×(4S-12P)

200kV 回路用 100Ω、10A(通電電流)、75Ω×(4S-3P)である。

30 秒運転の温度上昇は 400kV、200kV 回路用で共に約 10℃、100 秒運転では約 121℃と予想、抵抗器の最大使用温度 230℃以下のため問題はない。ただし、サーモラベルを貼り付けて温度監視を実施する。

⑧加速電源用接地装置

定格は、DC200kV、2.38MΩ×3 台 (各段間に 1 台) である。

- ・放電抵抗器

定格は、抵抗器 1 本あたり 170k Ω 、接地装置 1 台あたり 14 直列となる。

- ・絶縁変圧器

定格は、3 相 50Hz、210V/210V/210V、3 台（各段間に 1 台）、連続使用

接地動作に関しては、長パルス化による影響がないため、100 秒運転においても、放電抵抗器及び接地装置駆動制御電源用絶縁変圧器は使用可能である。

⑨加速電源分圧器(VD1～3)

分圧器は、加速出力用 DC500kV、第 1 加速出力用 DC400kV、第 2 加速出力用 DC200kV、10 秒、Duty1/60 の 3 種類を用いているが、ここでは DC500kV 用分圧器について検討する。分圧用の抵抗器は、日本ヒドラジン製、型式 SR8HVC、20M Ω ×(48S・2P)である。損失は、520W(=500²kV/(20M Ω ×48/2))となり、この値を定格の 10 秒間とすると、5200J になる。その後、抵抗から油に熱伝達され油温度が上昇するが、この時の、抵抗から油への熱伝達で許容損出が制限される。油への熱伝達と油の熱容量は、各々 25W/K、213kJ/K となり、抵抗の油からの温度上昇を 21K、油の温度上昇を 40K とすると、定格での許容運転時間は、約 16000 秒となる。100 秒運転における油温上昇は 1℃以下となり、使用可能である。

⑩加速電源電流計測装置(SH1～3)

電流計測装置は、加速出力用 DC500kV/64A、第 1 加速出力用 DC360kV/±20A、第 2 加速出力用 DC180kV/±10A、10 秒、Duty1/60 の 3 種類が用いられている。ここでは、加速出力用電流計測装置について検討する。電流計測装置用の抵抗器には、富士抵抗器製無誘導型精密抵抗器 CWMD-150W、1.178 Ω ×(1S・15P)が使用されている。図-7 加速電源電流計測装置電流—時間特性曲線図から 36A、30 秒運転は可能であったが、定格(64A)、100 秒運転では運転範囲内ではあるが裕度がないことで、容量増大が必要となる。

⑪加速電源ブリーダ抵抗器

定格は、500k Ω 、500kW、10 秒、Duty1/60 であり、電力型不燃性巻線抵抗器 (71.4k Ω ,250W)×(10P-14S/段)×5 段、抵抗総数 700 本から構成されている。本抵抗器は、設計当初は 10 秒運転(Duty1/60)において公称電力値 175kW(=250W×700 本)である。30 秒運転では、抵抗器単体の通電能力は公称値の 6 倍、隣接する抵抗器による相互の熱的影響（抵抗器間の空間が約 50mm）による通電能力の低下を考慮し、低減率=50%と評価すると、175kW×6×0.5/500kW=1.05 倍となり定格相当となり電力裕度は殆どないため、冷却ファンの追加及びサーモラベルによる温度監視を実施した。100 秒運転では、電力裕度が約 0.53 倍(=175kW×3×0.5/500kW)の大幅な低下により新設の強制風冷型抵抗器に交換する必要がある。今後、発熱量の低下に向けて、既設抵抗器の結線を変えて高抵抗化し、ブリーダー電流を下げた場合の加速電源の動作試験を行う予定である。この結果に基づいて改造案を決定する。

⑫DC、AC リアクトル

- ・ DC リアクトル

本リアクトルは、巻き型に一系列 OC ケーブル(Outdoor Closslinked polyethylene : 屋外用ポリエチレン絶縁電線 6.6kV,22mm²) を巻き付けたものである。ケーブルの内側は、巻き型に接触し、外側は大気に露出している。短時間の損失は、コイルの熱容量で吸収されるが、温度上昇後

は片側の大気に放熱するものと考えられる。本リアクトルは、定格電流 64A で約 1000 秒までの通電が可能である。ただし、休止時間の間に内側のケーブルの放熱が構造上、殆ど期待できないため、大気側のケーブル被覆表面にサーモラベルを貼り付け温度監視を実施すると共に、内側の温度の監視方法を検討する予定である。

・AC リアクトル

本リアクトルは、巻き型に OC ケーブル 3 本(6.6kV,100mm²)を 3 列に巻き付けたものである。内側のケーブルの放熱は、DC リアクトルよりも期待できない構造である。

定格運転の 10 秒では電流は 770A であり、30 秒運転では 6.6kV 回路に於ける電流は最大で約 300A である。図-8 AC リアクトル電流-時間特性曲線図から 30 秒通電は問題なかったが、100 秒運転では運転範囲が電流上限値付近となり、裕度もあまりないため容量増大が必要となる。

⑬加速電源制御盤

IEGT インバータの増設に伴い、本制御盤の既設品に追加する新設品が必要となる。

⑭低圧制御ユニット

TIMER 基板（運転時間超過検出設定）及び PLC 定数(100s 対応)の変更。

(2)引出電源

①特高受電盤真空遮断器(52PN)

真空遮断器の定格は、24kV、1200A 連続である。

100 秒運転時の 18kV ライン電流は～300A 程度であり、負イオン生成部電源の仕様から見ても 10 秒運転とほぼ同様である。定格電流値内であることから 100 秒運転は可能である。

②ソース電源用絶縁変圧器(TRH)

定格は、8.8MVA、18kV/6.6kV、30～600 秒、Duty1/60 である。

Duty1/60 にて 100 秒運転を繰返しても、巻線の温度上昇は 45K で温度上限値 55K を超えない。さらに、Duty1/30 にしても温度上限値を超えないため 100 秒運転は可能である。

③MCB(52E)

定格運転(-10kV,80A)では 10 秒が限界であり、30 秒運転では定格の 60%(48A)まで可能であった。図-9 引出電源保護協調曲線図から、定格での 100 秒運転は不可能である。MCB(800AF/800AT)の交換が必要となる。

④主回路ヒューズ 1000A(F1)

図-9 引出電源保護協調曲線図から 30 秒運転は十分可能であったが、定格(-10kV,80A)での 100 秒運転は不可能であるため、新規ヒューズに交換する必要がある。

⑤サイリスタ(THY)

図-9 引出電源保護協調曲線図から、100 秒運転(-10kV,80A)は可能である。

⑥変圧器(T1)

図-9 引出電源保護協調曲線図から、100 秒運転(-10kV,80A)は可能である。

⑦ダイオード(D1)

図-9 引出電源保護協調曲線図から 30 秒運転は十分可能であったが、定格(-10kV,80A)での 100 秒運転では不可能であり、新規ダイオードに交換する必要がある。

⑧GTO(No.11～16, No.21～26)

・ GTO 素子

GTO 接合部の温度制限のために、30 秒運転では約 70A まで、100 秒運転では 40A までは運転可能であるが、定格 100 秒運転は不可能である。GTO 素子の冷却フィンの増力が必要となる。

・ GTO 用ゲートユニット

30 秒運転で既にゲートユニットを短時間定格から連続定格に改造を行ったため、これは改造不要である。

⑨ダミー抵抗器(R9)

定格は、48k Ω 、1.6kW、ホーロー被膜抵抗器(3k Ω ,100W)×16S である。

運転投入時電力(10²kV/48k Ω)=2100W、抵抗器 1 本当り約 132W(定格 1.32 倍)となる。一般的に、100 秒運転では抵抗器単体の通電能力は公称値の 3 倍、隣接する抵抗器による相互の熱的影響による通電能力の低下を考慮し、低減率を 50%と評価すると、100W×3×0.5/132W=1.14 倍であり、定格相当となり裕度は殆どない。また、本抵抗器は電源盤内に設置され、盤には冷却ファンを設けていないため、外部からの冷却効果はまったく期待できない。このため抵抗器の容量増加が必要となる。

⑩電源盤内保護設定

過電流設定は、現状のままであるが、運転時間超過検出設定(2TOX)を変更する。

⑪低圧制御ユニット

TIMER 基板（運転時間超過検出設定）及び PLC 定数(100s 対応)の変更。

(3)アーク電源

①MCB(52R)

図-10 アーク電源保護協調曲線図から、30 秒運転(110V,2800A)は充分可能であったが、100 秒運転(150V,3500A)は不可能である。MCB(800AF/800AT)と交換が必要となる。

②主回路ヒューズ(F1)

図-10 アーク電源保護協調曲線図から、30 秒運転(110V,2800A)は十分可能であったが、100 秒運転(150V,3500A)についても問題ない。

③サイリスタ(THY)

図-10 アーク電源保護協調曲線図から、100 秒運転(150V,3500A)は可能である。ただし、サーモラベルを貼り付けて温度監視を実施する。

④変圧器(T1)

図-10 アーク電源保護協調曲線図から、100 秒運転(150V,3500A)は可能である。

⑤ダイオード(D1)

図-10 アーク電源保護協調曲線図から、100 秒運転(150V,3500A)は可能である。ただし、サーモラベルを貼り付けて温度監視を実施する。

⑥GTO1～8

定格 100 秒運転は可能である。

⑦ダミー抵抗器(R3)

定格は、 24Ω 、 $6kW$ 、抵抗器($2k\Omega$, $500W$) $\times 12S$ である。

10 秒運転での定格時の損失= $120^2V/24\Omega=600W$ で、30 秒では、 $110^2V/24\Omega=505W$ である。定格の 1/10 以下なので可能であった。100 秒運転時の熱量は $940W$ であるので、100 秒化は可能である。ただし、サーモラベルを貼り付けて温度監視を実施する。

⑧電源盤内保護設定

過電流設定は、現状のままであるが、運転時間超過検出設定(2TOX)を変更する。

⑨低圧制御ユニット

TIMER 基板（運転時間超過検出設定）及び PLC 定数(100s 対応)の変更。

(4)フィラメント電源

①MCB(52F)

現状の MCB 動作特性では、100 秒運転時の電流上限値は、変圧器(T1～8)定格電流 $528A(=48kVA \times 8 / \sqrt{3 \times 420V})$ の 72%($380A$)である。DC 定格($13V$, $8000A$)時の AC 電流を推測すると $360A(=13 \times 8000 \times 1.8 / \sqrt{3 \times 420V})$ 程度であり許容範囲内であることから、現状のままで使用して運転後トリップが頻発するような場合に対応する。

②主回路ヒューズ(F1)

100 秒運転($13V$ 、 $8000A$)は現状のまま可能である。

③サイリスタ(THY)

定格電流($1200A$)では、～30 秒までが上限であり、100 秒運転では定格電流 70%($840A$)が上限であるため、定格電流 83%($1000A$)になるとサイリスタスタックの交換が必要となる。

④8 系統変圧器(T1～8)、タップ付き変圧器

8 系統変圧器(T1～8)及びタップ付き変圧器の定格は、 $48kVA$ 、 $420V/28V$ と $1.6kVA$ 、 $242V/4.84 \sim 24.2V$ である。定格電流($1200A$)では～20 秒までが上限であり、100 秒運転では定格電流 40%($480A$)が上限であるため、変圧器を冷却するための冷却ファンの追加改造が必要である。

⑤ダイオード(D1A1～8)

30 秒運転では、現状のまま使用し、問題無かった。100 秒運転時の許容範囲はほぼ定格値($200V$, $250A$)と一致しており、ダイオードの交換が必要となる。

⑥ダミー抵抗器(R3-1～8)

定格は、 4Ω 、 $1kW$ 、抵抗器($500W$, 2Ω) $\times 2S$ である。100 秒運転時の損出は $15^2V/4\Omega=56.3W$ となり定格の 1/10 以下となるため、100 秒運転は可能である。

⑦電源盤内保護設定

過電流設定及び運転時間超過検出設定(2TOX)を変更する。

⑧低圧制御ユニット

IMER 基板（運転時間超過検出設定）及び PLC 定数(100s 対応)の変更。

(5) バイアス電源

① MCB(52B)

現状の MCB 動作特性では、100 秒運転時の電流上限値は、変圧器(T1)定格電流 $66\text{A}(=48\text{kVA}/\sqrt{3}\times 420\text{V})$ の 32%(21A)である。DC 定格(2V,500A)時の AC 電流を推測すると $3\text{A}(=2\text{V}\times 500\text{A}\times 1.8/\sqrt{3}\times 420)$ 程度であり許容範囲内であることから、現状のままで使用して運転後トリップが頻発するような場合に対応する。

② 主回路ヒューズ(F1)

100 秒運転(2V、500A)は現状のままで可能である。

③ サイリスタ(THY)

定格電流 31%(500A)は 100 秒運転は可能である。

④ 変圧器(T1)

定格は、48kVA、420V/21V である。定格電流 31%(500A)は 100 秒運転は可能である。

⑤ ダイオード整流器(D1A)

定格電流 31%(500A)は 100 秒運転は可能である。

⑥ ダミー抵抗器(R3)

定格は、500W、2Ω、抵抗器(500W,2Ω×1S)である。100 秒運転時の損出は $2^2\text{V}/2\Omega=2\text{W}$ となり定格の 1/10 以下となるため、100 秒運転は可能である。

⑦ 電源盤内保護設定

過電流設定及び運転時間超過検出設定(2TOX)を変更する。

⑧ 低圧制御ユニット

IMER 基板（運転時間超過検出設定）及び PLC 定数(100s 対応)の変更。

(6) PG フィルター電源

① MCB(52P)

現状の MCB 動作特性では、100 秒運転時の電流上限値は、変圧器(T1)定格電流 $275\text{A}(=200\text{kVA}/\sqrt{3}\times 420\text{V})$ の 75%(210A)である。DC 定格(5.5V,6.8kA)時の AC 電流を推測すると $93\text{A}(=5.5\text{V}\times 6.8\text{kA}\times 1.8/\sqrt{3}\times 420\text{V})$ 程度であり許容範囲内であることから、現状のままで使用して運転後トリップが頻発するような場合に対応する。

② 主回路ヒューズ(F1)

定格電流 68%(6.8kA)は 100 秒運転は可能である。

③ サイリスタ(THY)

定格電流 68%(6.8kA)は 100 秒運転は可能である。

④ 変圧器(T1)

定格は、200kVA、420V/14V である。定格電流の 68%(6.8kA)までは、100 秒運転が可能である。

⑤ ダイオード整流器(D1A)

定格電流の 68%(6.8kA)までは、100 秒運転が可能である。

⑥ダミー抵抗器(R3)

定格は、 1Ω 、 $1000W$ 、抵抗器($500W, 2\Omega$) $\times 2P$ である。 100 秒運転時の発熱損出は $5.5^2V/1\Omega=30.3W$ となり定格の $1/10$ 以下であり、 100 秒運転は可能である。

⑦電源盤内保護設定

過電流設定及び運転時間超過検出設定(2TOX)を変更する。

⑧低圧制御ユニット

TIMER 基板（運転時間超過検出設定）及び PLC 定数($100s$ 対応)の変更。

(7)偏向コイル電源

①特高受電盤真空遮断器(52BN)

真空遮断器の定格は、 $24kV$ 、 $1200A$ 連続である。

100 秒運転時の 52BN 側の $18kV$ ライン電流は $100A$ 以下であり、遮断器定格電流値以下であり使用可能である。

②偏向コイル用特高変圧器(TRB)

定格は、 $2530kVA$ 、 $18kV/579V \times 2$ 、 13 秒、Duty $1/60$ である。

本変圧器は、 85% 連続運転、 100 秒定格運転で設計されている。 100 秒運転での使用は十分可能である。

③サイリスタ(THY)

定格電流 $1400A$ 、強制風冷の富士電機製（型式;RBE6PR03-25）を使用している。 100 秒運転の場合は定格電流の $57\%(850A)$ 以下まで運転可能である。裕度はないが使用可能である。

④ダミー抵抗器(Rd1,2)

定格は、 $Rd1(5kW, 750\Omega)$ 、 $Rd2(3kW, 1.2k\Omega)$ であり、 100 秒運転時の各損失は $163W$ 、 $102W$ で定格 $1/10$ 以下なので使用可能である。

⑤スナバ回路($Rs1 \cdot 2, Cs1 \cdot 2$)

定格は、 $Rs1, 2(500W, 300\Omega)$ 、 $Cs1, 2(1kV, 10\mu F)$ である。

本回路は、短時間の使用率 50% で設計されているので 100 秒運転である長時間連続使用はできない。 100 秒化においては、抵抗器の容量の増力が必要となる。

⑥制御・保護

運転時間超過検出設定を変更する。

(8)HVT 周辺機器

①HVT 分電盤真空遮断器(52PNM,52PNC)

遮断器の定格は、 $7.2kV$ 、 $600A$ 連続である。

100 秒運転時の 52PNM 側の $6.6kV$ ライン電流は、最大で約 $660A$ であり、これは 10 秒運転時とほぼ同等の電流値ではあるが、定格電流を僅かに超えている。導体部の温度上昇を考慮した上で使用不可の判断をする。52PN は制御電源のためのものであり、条件的には変わらないため使用可能である。

②HVT 内高圧変圧器(TRH1・2U/L)

定格は、6.6kV/420V、2.3MVA×2 台、6.6kV/420V、1.9MVA×2 台の計 4 台ある。これらの変圧器は、85%連続運転、100 秒定格運転が可能のように設計されているため使用可能である。

③HVT 制御用変圧器(TRH3・4U/L,TRH5)

定格は、6.6kV/200V、30kVA×5 台である。これらは、制御電源に使用するため連続定格で設計されているので使用可能である。

④SF₆ ガスダクト

加速用の 150φ×10t、アルミニウム (A1) 製の中空導体内に 6.6kV、80mm²×3 本の MLFC ケーブルが AC 電力供給用に設置されている。このケーブルの損失は、加速用導体、SF₆ ガス、外管シースを通して大気に放熱されるが、MLFC ケーブルの連続最高許容温度は 110℃であることから、100 秒運転時に MLFC ケーブルが許容温度以下となるように、改造を行う必要がある。

ケーブルの定格時の単位長さ当りの損出(P_c)と、ケーブルの熱容量(H_c)および、定格運転時のケーブル熱容量を考慮した 100 秒後の温度上昇はΔT は以下で与えられる。なお通電電流は定格値、770A(=8.8MVA/√3×6.6kV)とした。

$$80\text{mm}^2 \text{ ケーブル抵抗値}=2.1\text{E-}6\Omega \cdot \text{cm} \quad \text{質量}=8.9\text{E-}6\text{kg/mm}^3 \quad \text{比熱}=0.39\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$P_c=2.1\text{E-}6\Omega \cdot \text{cm} \times 100\text{cm} / 0.8\text{cm}^2 \times 770^2\text{A} \times 3 \text{ 本}=467\text{W}$$

$$H_c=80\text{mm}^2 \times 10^3\text{mm} \times 8.9\text{E-}6\text{kg/mm}^3 \times 3 \text{ 本} \times 0.39\text{kJ/kg} \cdot \text{K}=830\text{J/K}$$

$$\Delta T=100\text{s} \times 467\text{W} / 830\text{J/K}=56^\circ\text{C}$$

ここで運転開始前の基準温度を 40℃とすると、100 秒後の到達温度は 96℃となり、殆ど許容温度に達することが分かる。裕度が無いことから 100 秒運転に当たってはガス冷却装置の追加等も検討する必要がある。

⑤サージブロッカー周りのケーブル (HVT～イオン源保守ステージ端子台間)

大電流を通電するケーブルとして、以下のものが想定される。

- ・フィラメント電源ケーブル (MLFC250mm²×8 本×2 系統)

100 秒運転時におけるフィラメント 1 系統当りの電流は、8000A/8 系統=1000A とする。その時の単位長さ当りの損出(P_c)と、ケーブルの熱容量(H_c)および、1000A 運転時のケーブル熱容量を考慮した 100 秒後の温度上昇はΔT は以下で与えられる。

$$250\text{mm}^2 \text{ ケーブル抵抗値}=2.1\text{E-}6\Omega \cdot \text{cm} \quad \text{質量}=8.9\text{E-}6\text{kg/mm}^3 \quad \text{比熱}=0.39\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$P_c=2.1\text{E-}6\Omega \cdot \text{cm} \times 100\text{cm} / 2.5\text{cm}^2 \times 1000^2\text{A}=84\text{W}$$

$$H_c=250\text{mm}^2 \times 10^3\text{mm} \times 8.9\text{E-}6\text{kg/mm}^3 \times 0.39\text{kJ/kg} \cdot \text{K}=867\text{J/K}$$

$$\Delta T=100\text{s} \times 84\text{W} / 867\text{J/K}=9.7^\circ\text{C}$$

ここで運転開始前の基準温度を 40℃とすると、100 秒後の到達温度は約 50℃となり、十分な裕度がある。ただし、ケーブルの冷却があまり期待できない構造であるため、運転中に於けるケーブルの温度監視が必要と考える。

・ アーク電源ケーブル (MLFC250mm²×本×2 系統)

100 秒運転時におけるアーク 1 系統当りの電流は、3500A/2 系統=1750A とする。その時の単位長さ当りの損出(Pc)と、ケーブルの熱容量(Hc)および、1750A 運転時のケーブル熱容量を考慮した 100 秒後の温度上昇ΔT は以下で与えられる。

$$P_c = 2.1 \text{E-}6 \Omega \cdot \text{cm} \times 100 \text{cm} / 2.5 \text{cm}^2 \times 1750^2 \text{A} = 257 \text{W}$$

$$\Delta T = 100 \text{s} \times 257 \text{W} / 867 \text{J/K} = 30^\circ \text{C}$$

ここで運転開始前の基準温度を 40℃とすると、100 秒後の到達温度は約 70℃となり、裕度がある。しかし、フィラメントに比べ、裕度的には厳しい条件であることが予想される。また、フィラメントケーブル同様に冷却効果があり期待できない構造であるため、運転中に於けるケーブルの温度監視は特に重要である。

4. 100 秒化改造項目

これまでの 21 秒通電時の各機器の温度上昇測定試験の結果を基に、100 秒化予備検討を行った結果、以下のような改造が必要であることが分かった。表-6 に N-NBI 電源設備のうち、加速電源の 100 秒化改造項目を示す。今後、予定している各種試験および再検討結果次第では、改造項目の追加変更等が生じることも予想されるが、2010 年までには、最終的な改造仕様を決定する予定である。本改造に当っては、改造経費を最小にする必要があり、そのためには原子力機構単独で改造が可能な項目と、設計・製作メーカーの高度な製作技術が必要な改造項目に分析・分類する必要がある。表-7 に N-NBI 電源系設備のうち引出電源及び負イオン生成部電源の 100 秒化改造項目を示す。

表-6 N-NBI 電源系設備 100 秒化改造項目（加速電源）

電源	100 秒化改造項目	台数	備考
加速電源コンバータ盤	盤内ファン増強、風量増加用バルブ追加	1 式	T
	主回路 PN 接続変更		
	リアクトル盤新規製作		
	PG 盤制御回路変更		
	保護設定値変更		
加速電源インバータ盤	IEGT インバータ盤 9 面増設	1 式	T
	コンデンサ盤 3 面新設		
	保護設定値変更		
加速電源制御盤	新規製作	1 式	T
加速電源ブリーダ抵抗器	抵抗器増強又は新規製作	1	N
加速電源変圧整流器	ダイオード交換	3	H
	SF ₆ ガス冷却装置	1 式	
加速電源電流計測装置	抵抗器増強	3	
	絶縁強化	3	

表-7N・NBI 電源系設備 100 秒化改造項目（引出電源及び負イオン生成部電源他）

電源	100 秒化改造項目	台数	備考
引出電源	MCB(52E)交換	1×2	J
	GTO 冷却ファン交換	12×2	
	タミ抵抗器(R9)増強	16×2	
	主回路ヒューズ(F1)交換	3×2	
	ダイオード(D1)交換	6×2	
	OC、運転時間超過レベル変更	1 式	
アーク電源	MCB(52R)交換	1×2	J
	運転時間超過レベル変更	1 式	
フィラメント電源	8 系統変圧器(T1～8)冷却用ファン追加	8×2	T
	タップ付変圧器冷却用ファン追加	〃	
	ダイオード(D1A1～8)交換	48×2	
	サイリスタ(THY1～6)交換	6×2	
	OC、運転時間超過レベル変更	1 式	J
ハイス電源	OC、運転時間超過レベル変更	〃	J
PG フィルタ電源	OC、運転時間超過レベル変更	〃	J
偏向コイル電源	スナバー抵抗器(Rs1,2)増強	2	J
HVT	真空遮断器(52PNM)交換	1	H
	HVT 内全体放熱増力	1 式	J
SF ₆ ガスタクト	SF ₆ ガスタクト冷却装置	〃	H
AC リアクトル	内部放熱促進装置追加又は新規製作	2	H
特高受配電盤	真空遮断器(89TN)交換	1	H
	真空遮断器(52AN)交換	1	
サージブロッカー周りケーブル	各電源用ケーブル	1 式	H
低圧制御ユニット	TIMER 基板改造	6	T
	PLC 定数変更	1 式	

5. まとめと今後の設計に向けた課題

(1) JT-60 実験運転におけるサーモラベル温度監視結果

①加速電源では、並列機器であるブリーダ抵抗器の温度上昇が 90℃と最も高かったが、本抵抗器の最高使用温度は 340℃であり使用にあたっては特に問題とはならない。

②負イオン生成部電源では、アーク電源及びフィラメント電源のダミー抵抗器の温度上昇が、それぞれ 80℃以上と 50℃と最も高かったが、許容値内であり使用にあたっては特に問題とはならない。その他の機器は、40℃以下と目立った温度上昇は観測されなかった。

③今回のビームパルス幅が最大 27 秒の結果を外挿すると、30 秒運転は、現状のままで十分可能と判断できる。

(2) 100 秒化に向けての課題

①平成 20 年 8 月までの JT-60 実験運転中に、温度上昇が高い電源機器についてはサーモラベル以外に放射温度計又は赤外カメラを用いた温度測定を実施する予定であり、より精度の高い温度測定を目指すと共に、温度上昇の時間変化をトレンドデータとして取得する。

②真空遮断器、加速電源変圧整流器、フィラメント電源、SF₆ ガスダクト及び電源ケーブルについては、今後、より詳細な設計検討が必要であり、30 秒までのパルス運転の実績を解析した上で、最終的な仕様を決定する予定である。

(3) 今後の進め方

①平成 20 年 8 月までの JT-60 実験運転又はその後の N-NBI 改良試験期間において、加速電源ブリーダ抵抗器の高抵抗化試験を実施する予定である。その結果を踏まえ、既設抵抗器を改造するか又は新規に抵抗器を製作するかを判断する予定である。

②JT-60 実験運転では、30 秒入射を目指しつつ、各電源機器の温度監視を継続すると共に、温度上昇が大きい機器については、100 秒化改造項目として随時検討する予定である。また、各電源機器については、更なる詳細な検討を進め、2010 年までに最終改造仕様を決定する予定である。

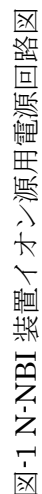
③100 秒化改造項目で、大きな位置を占める加速電源の出力電圧制御方式の変更がある。これは既設 GTO と新設 IEGT との組み合わせによるもので、スイッチング速度の異なった両者を並列接続して用いるという特殊な運転となる。このため実機製作に先立ち、検証試験を実施した上で、回路定数等を決定する予定である。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、粒子ビーム加熱システム開発グループの皆様に感謝を申し上げます。また、本研究遂行にあたり、貴重なご意見・ご指導を頂きました細金延幸トカマク技術開発ユニット長に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 栗山正明 他、JT-60U 用負イオン NBI 装置の設計検討、JAERI-M 94-072
- [2] 河合視己人 他、JT-60U 用負イオン NBI 装置の建設、JAERI-Tech 2001-073
- [3] 能登勝也 他、JT-60SA NBI 加熱装置の電源系改造の予備検討、平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会装置技術研究会報告集、p.116(2007)



This is a blank page.

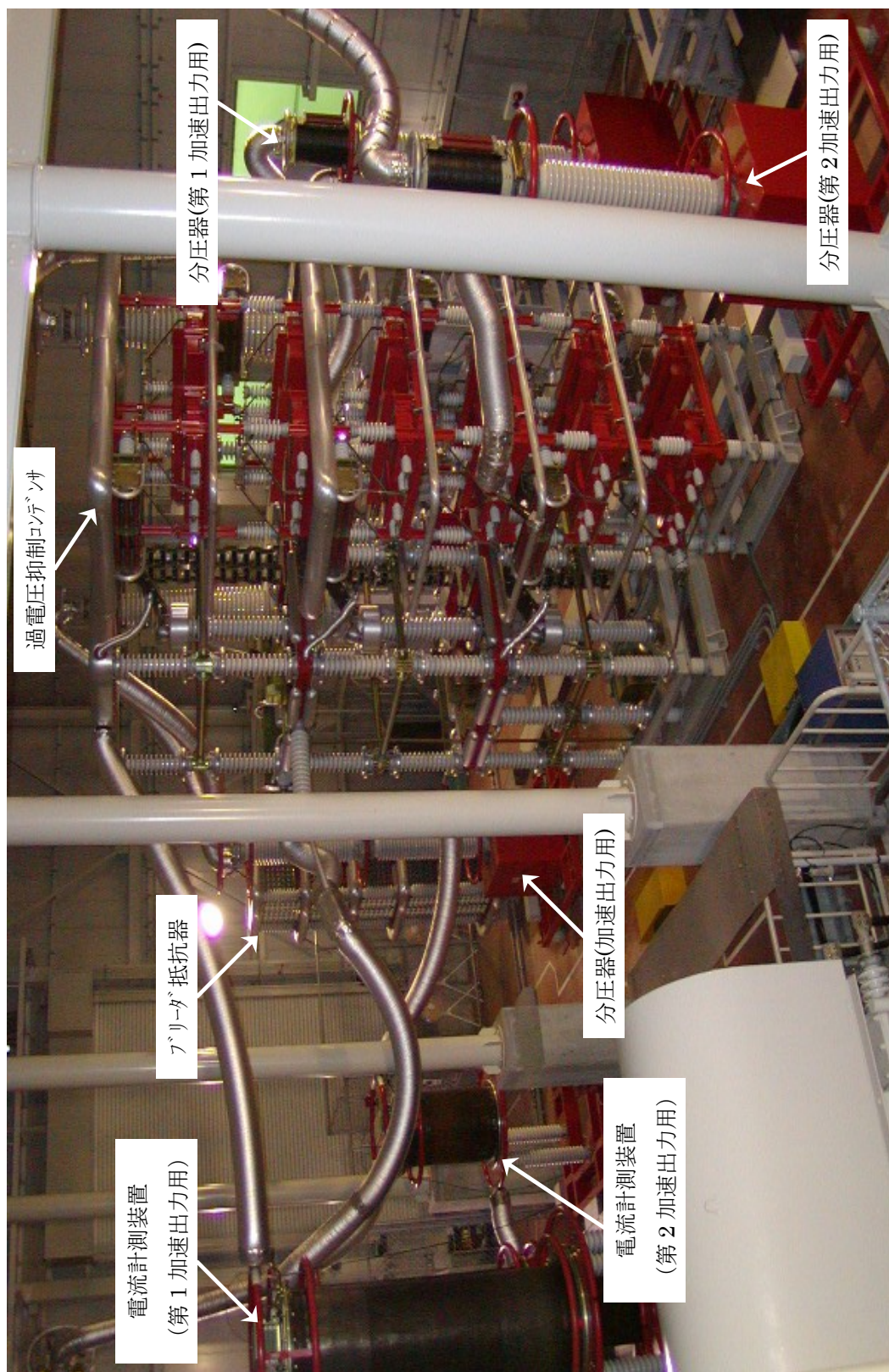


図-2 N-NBI 装置加速電源 (N-NBI 電源室機器)

This is a blank page.

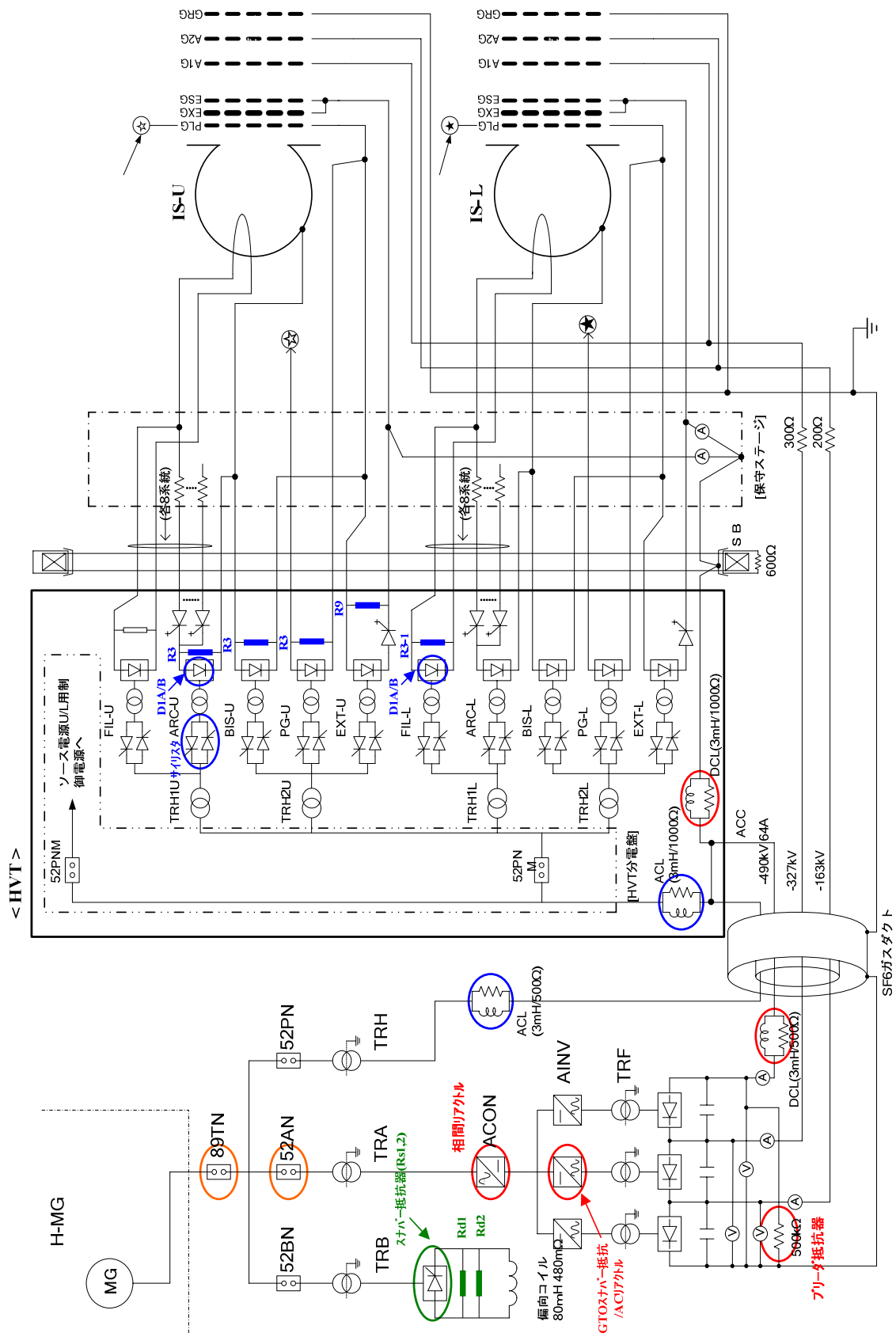
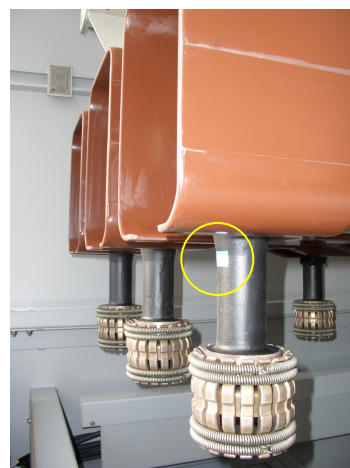


図-3 N-NBI装置イオン源用電源 (温度監視機器)

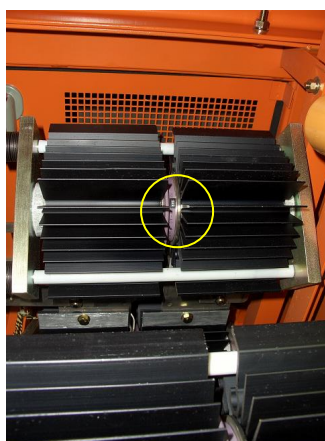
This is a blank page.



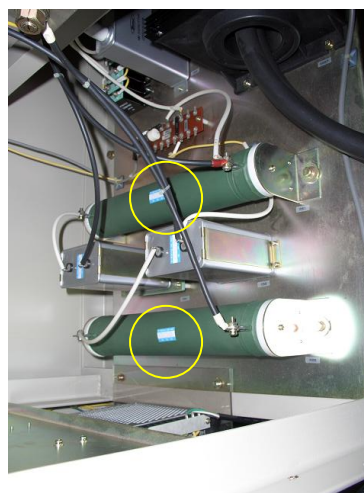
アーク電源
ダイオード(D1A)



特高盤
真空遮断器(89TN)



アーク電源
サイリスタ(THY)



偏向コイル電源
スバール抵抗器(Rs1,2)



引出電源
ブリッジ抵抗器(R9)



フィラメント電源
ブリッジ抵抗器(R3-1)

図-4 サーモラベル貼付箇所

This is a blank page.

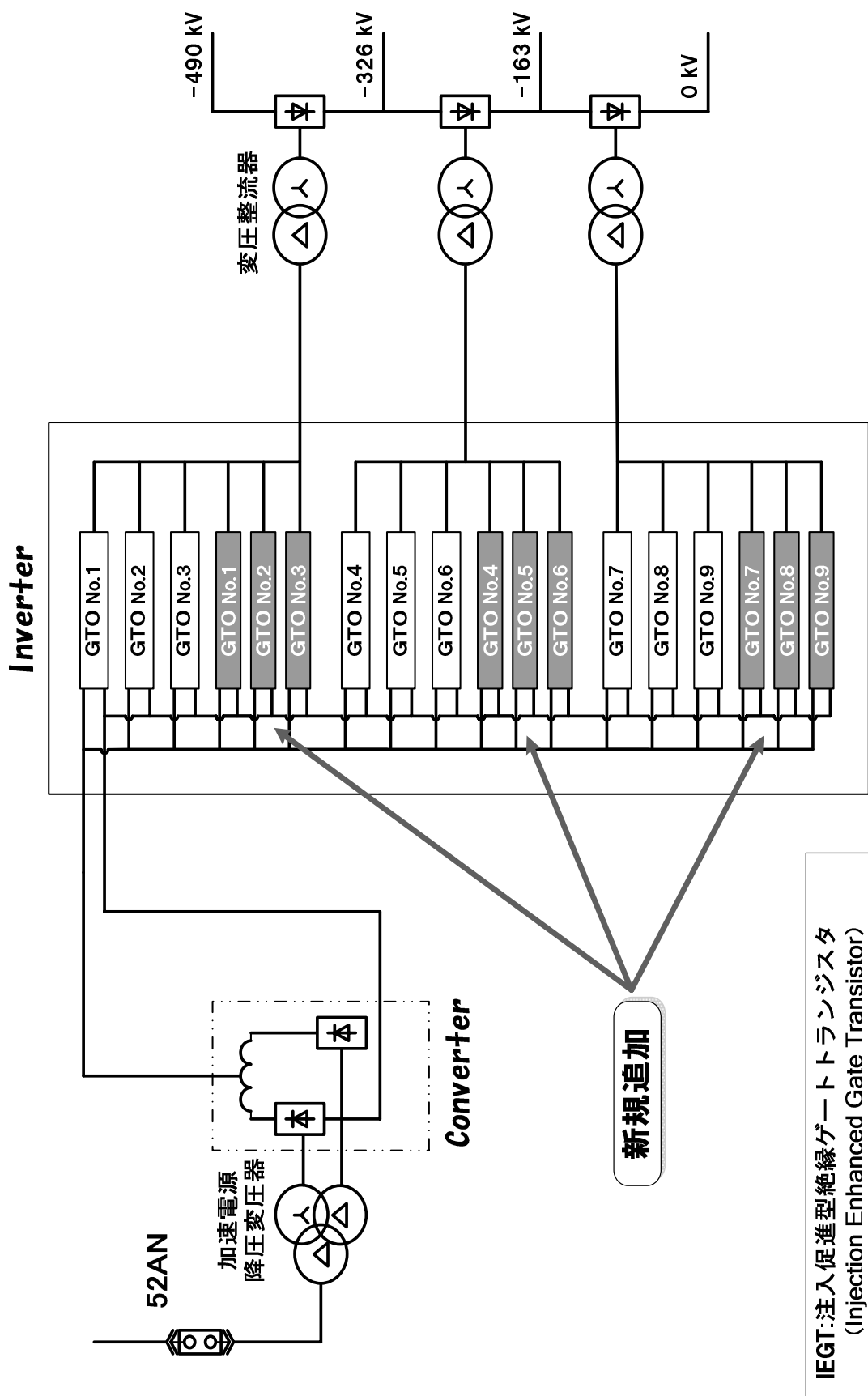


図-5 100 秒化改造後の加速電源出力電圧制御方式

This is a blank page.

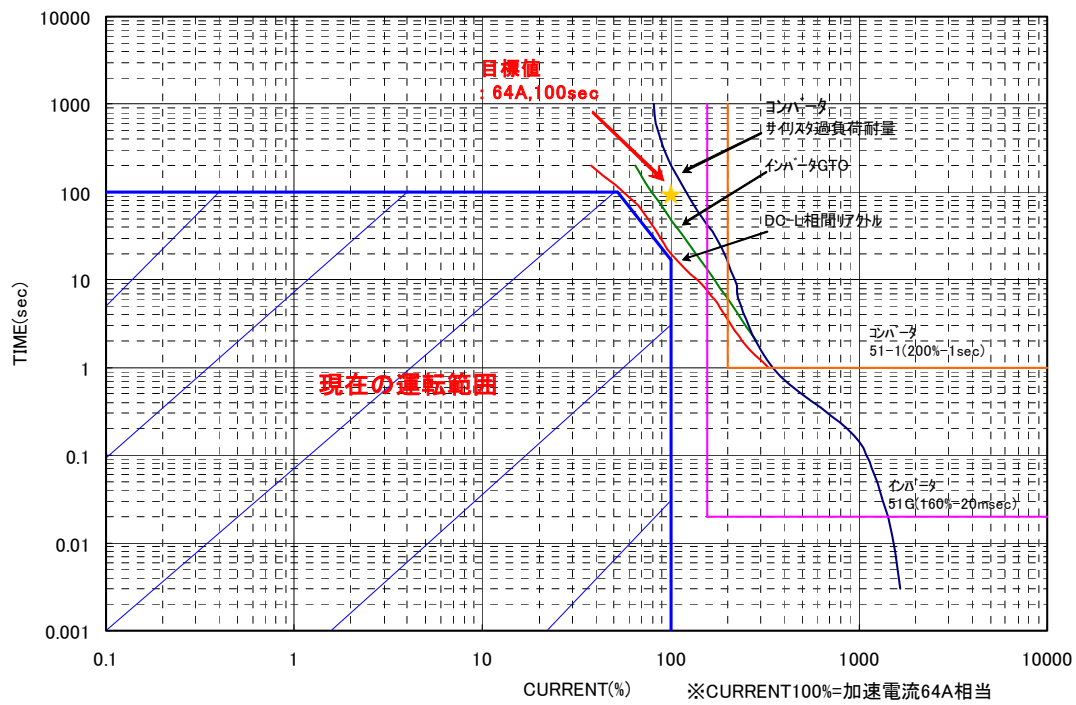


図-6 加速電源保護協調曲線図

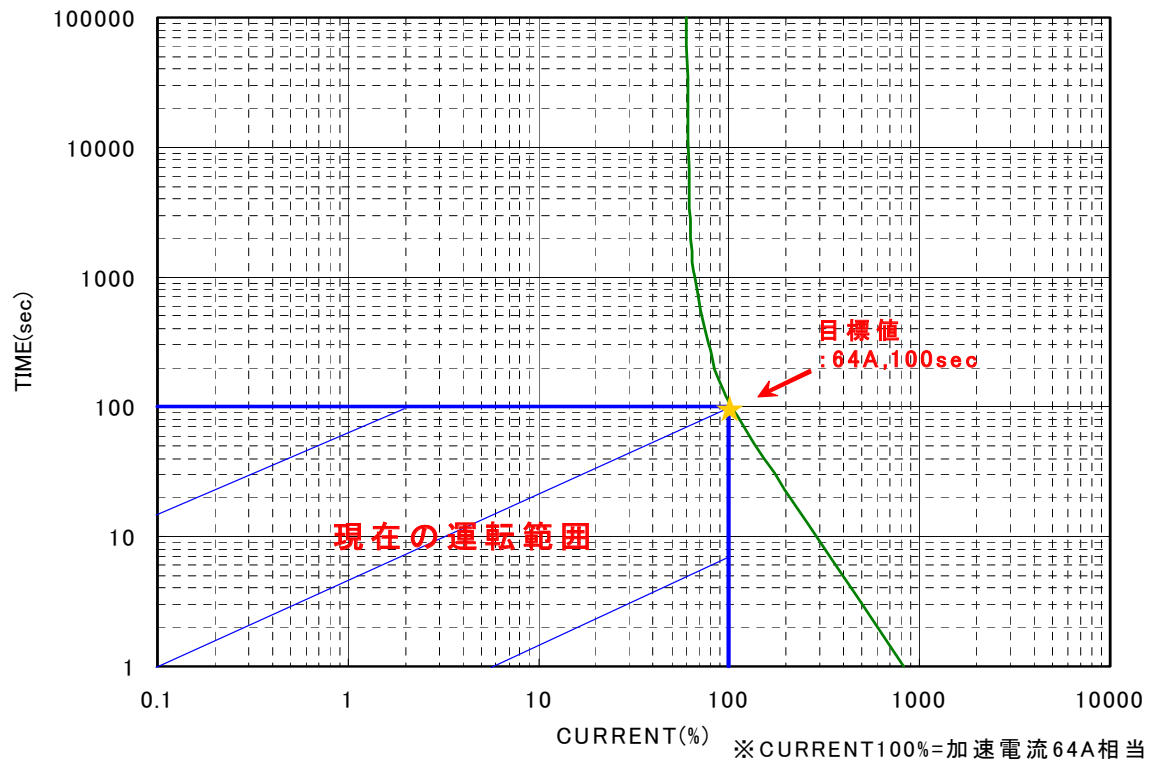


図-7 加速電源電流計測装置 電流 — 時間特性曲線図

This is a blank page.

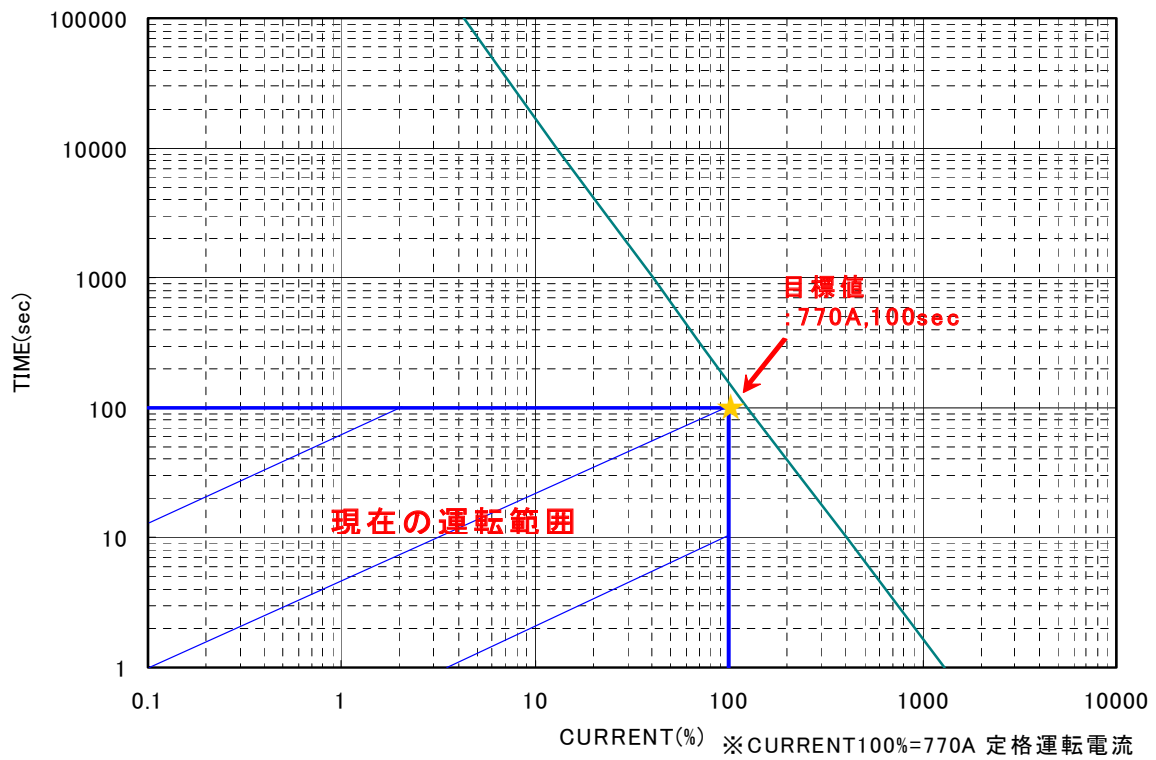


図-8 AC リアクトル 電流 — 時間特性曲線図

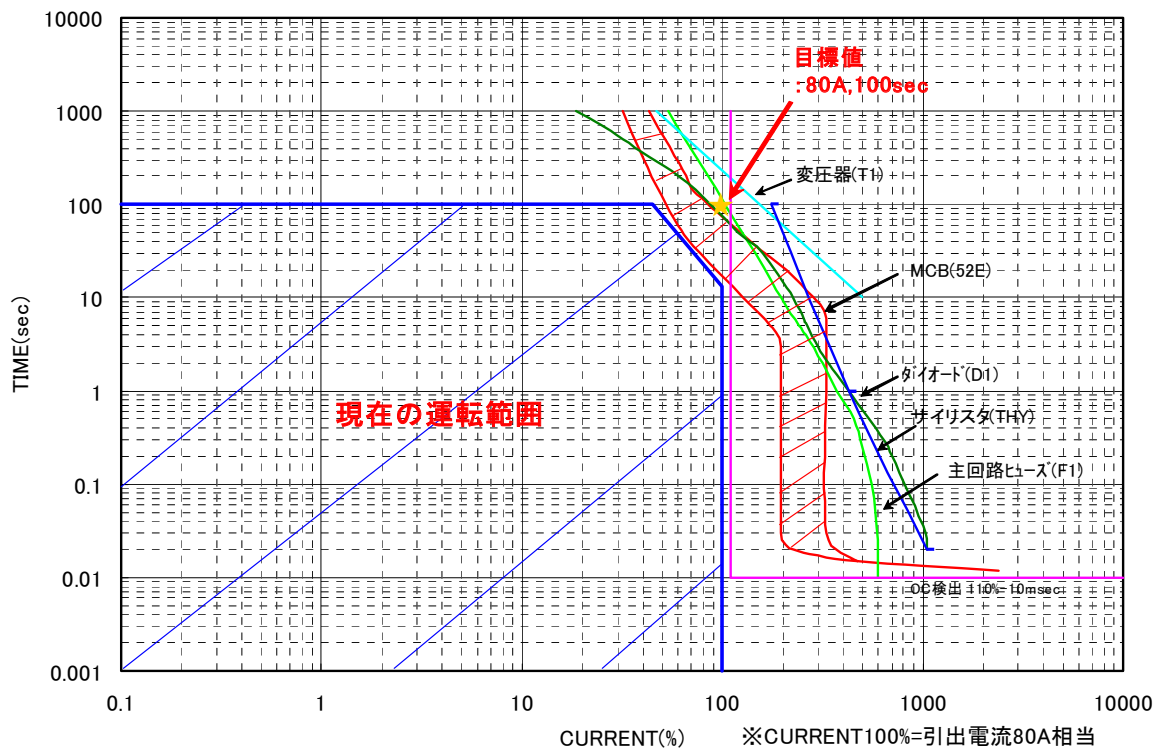


図-9 引出電源保護協調曲線図

This is a blank page.

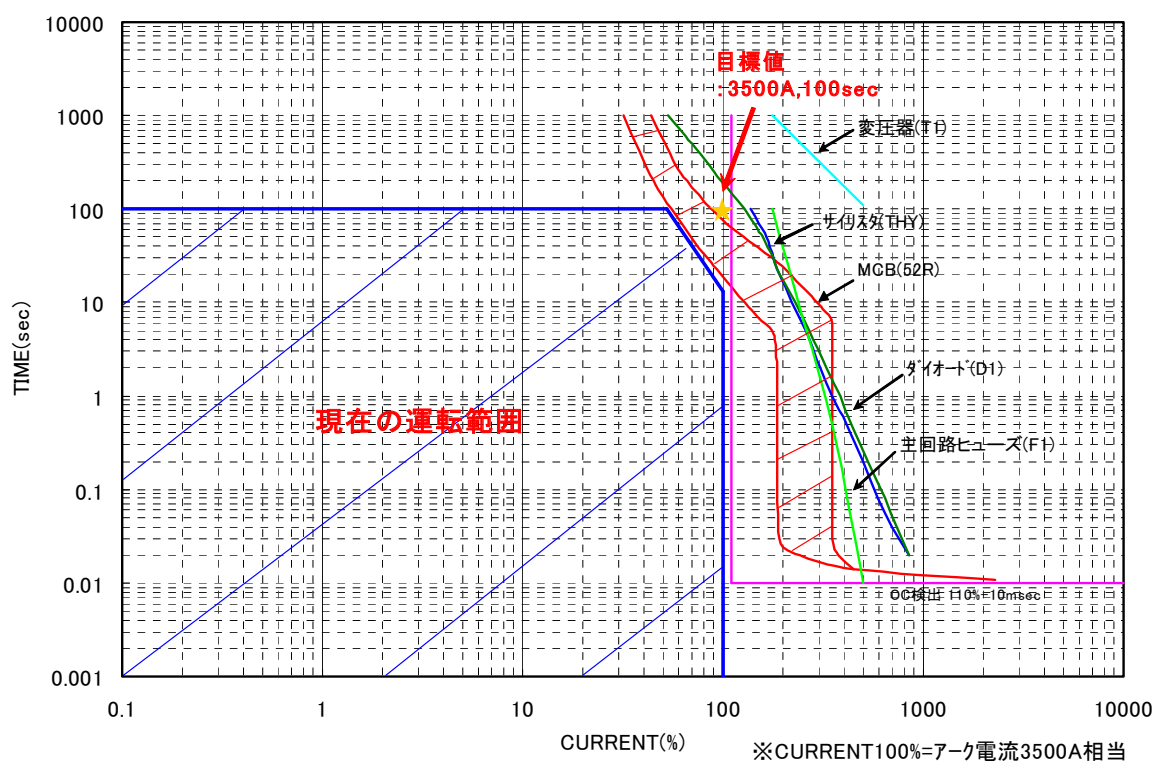


図-10 アーク電源保護協調曲線図

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度（質量密度）	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表 4 に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
流密度，放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エン트로ピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エン트로ピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²
モルエン트로ピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	′	1′ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	″	1″ =(1/60)′ =(π/648000) rad
リットル	l、L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733 (49) ×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402 (10) ×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691 (30) ×10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852 m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=1000 hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100 fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St =1 cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≐10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≐ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≐10 ⁻⁸ Wb
スチルプ	sb	1 sb =1 cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1 cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

