

ITER NBI用SINGAP-MAMuG加速器の 性能比較試験

Comparative SINGAP-MAMuG Test for the ITER Neutral Beam Injector

谷口	正樹	柏木	美恵子	梅田	尚孝	大楽	正幸
渡邊	和弘	井上	多加志	Hube	ert de E	sch*	Lennart Svensson

Masaki TANIGUCHI, Mieko KASHIWAGI, Naotaka UMEDA, Masayuki DAIRAKU Kazuhiro WATANABE, Takashi INOUE, Hubert de Esch* and Lennart Svensson*

核融合研究開発部門 加熱工学研究グループ

Plasma Heating Technology Group Fusion Research and Development Directorate

PSC

March 2009

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2009

ITER NBI 用 SINGAP-MAMuG 加速器の性能比較試験

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット

谷口 正樹・柏木 美恵子・梅田 尚孝・大楽 正幸・渡邊 和弘・井上 多加志

Hubert de Esch* • Lennart Svensson*

(2008年12月19日受理)

ITER 中性粒子入射加熱装置(NBI)用負イオン加速器には、単孔単段型 (SINGAP; Single-aperture single-gap)と多孔多段型 (MAMuG; Multi-aperture multi-gap)の2方式が提案さ れており、前者は CEA カダラッシュ研究所、後者は原子力機構において開発が進められて きた。ITER NBI 建設に向け、両者の性能を比較することを目的とした試験を ITER タスクと して行うこととなり、SINGAP 加速器を原子力機構の MeV 級イオン源試験装置に取り付けて MAMuG 加速器と同じ設備、計測システムで性能評価を行った。その結果、以下のことが明 らかとなった。

- SINGAP 加速器の最高保持可能電圧は 0.25 Pa の水素導入時で 800 kV であり、120 時間の コンディショニングが必要であった。これに対し、MAMuG では 60 時間のコンディショ ニング後、水素ガスを 0.2 Pa 導入することで 1 MV を保持することができた。
- MAMuGでは 796 keV, 320 mA の負イオン加速に成功したのに対し、耐電圧性能差により、 SINGAP では 672 keV, 220 mA にとどまった。
- 両加速器で負イオンと共に加速される電子量を比較した結果、同条件において SINGAP では MAMuG の 3 倍となることが判明した。

以上の様に、耐電圧性能、最大負イオンビーム電流、付随電子加速の観点から MAMuG が優れた特性であることが明らかとなり、ITER 機構との協議の結果、ITER NBI には MAMuG 方式が採用されることになった。

那珂核融合研究所(駐在): 〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1 *CEA カダラッシュ研究所

Comparative SINGAP-MAMuG Test for the ITER Neutral Beam Injector

Masaki TANIGUCHI, Mieko KASHIWAGI, Naotaka UMEDA, Masayuki DAIRAKU, Kazuhiro WATANABE, Takashi INOUE, Hubert de Esch*and Lennart Svensson*

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

> > (Received December 19, 2008)

For the ITER NBI, two accelerator concepts have been proposed. One is the SINGAP (single gap single aperture) developed at CEA Cadarache and the other is the MAMuG (Multi aperture multi gap) developed at JAEA. In order to assess the performance of the SINGAP and the MAMuG concepts at the same test facility under the same diagnostics, a collaborative R&D test was performed between JAEA and CEA Cadarache under an ITER task agreement. For this purpose, the SINGAP accelerator was installed at the MTF of JAEA. As the result, following new findings were obtained;

- The maximum voltage holding of the SINGAP was 573 kV without gas and 800 kV with H₂ gas feeding to 0.25 Pa after 120 hours of conditioning. This is lower than the MAMuG, which can sustain 1 MV with H₂ gas of 0.2 Pa after 60 hours of conditioning.
- The highest performance in the beam acceleration test for the SINGAP was 220 mA at 672 keV. This is lower than MAMuG, which achieved 796 keV, 320 mA H⁻ ion acceleration.
- The ration of coaccelerated electrons, I_e/I_H, for the SINGAP was 1.08 at the beamline pressure of 0.087 Pa. This is three times larger compared with the MAMuG (0.28).

From the viewpoint of voltage holding, maximum beam current and electron acceleration, the MAMuG showed better performance than the SINGAP, and it has been decided to choose the MAMuG as the baseline accelerator for the ITER NBI.

Keywords: Neutral Beam Injectior, SINGAP, MAMuG, Negative Ion Accelerator

^{*}CEA Cadarache, France

目次

1.	はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2.	試験装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	2. 1 SINGAP 加速器・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	2. 2 電流及びビーム分布計測・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	2.3 電子偏向磁石と電子ダンプ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
3.	SINGAP 加速器の耐電圧・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
	3.1 コンディショニング履歴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
	3.2 クランプ理論からの予測・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
4.	SINGAP 加速器でのビーム加速・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
	4.1 ビーム加速試験(1回目)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
	4.2 ビーム加速試験(2回目)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
	4.3 付随電子加速・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	. 8
5.	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2	25
参考	考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26

Contents

1.	Introduction · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
2.	Experimental setup · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	2. 1 SINGAP accelerator $\cdot \cdot \cdot$	
	2. 2 Current and profile measurement $\cdot \cdot \cdot$	
	2. 3 Electron deflection magnet and electron dump ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	
3.	Voltage holding of the SINGAP • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
	3. 1 Conditioning history $\cdot \cdot \cdot$	
	3. 2 Extrapolation of clump theory • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
4.	Beam acceleration • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
	4. 1 Results of test campaign $1 \cdot $	
	4. 2 Results of test campaign $2 \cdot $	
	4. 3 Electron co-acceleration • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
5.	Summary • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
Refe	erences • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	

This is a blank page

1 はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)では、プラズマ加熱、及び電流駆動用として、1基あたり 16.5 MW が入射可能な大パワーの中性粒子入射装置(NBI; Neutral Beam Injector)が必要であ る¹⁾。NBI ではまず加速器にて高エネルギー、大電流の重水素負イオンビームを発生する。 イオンビームはそのままではプラズマの閉じこめ磁場で偏向され直進できないため、ガス 中性化セルでの電子剥離反応により中性粒子(D⁰)に変換された後、プラズマへと入射され る。NBI の心臓部となる加速器は、エネルギーは1 MeV、電流密度 200 A/m² で 40 A の大 電流負イオンビーム加速が必要とされる。

大電流を発生するための加速器には、主として原子力機構において開発を進めてきた多 孔多段型²⁾(MAMuG; Multi-Aperture Multi-Grid)と、EUを中心に開発が行われてきた単孔単 段型³⁾(SINGAP; Single-aperture Single-gap)の2通りの加速器方式が提案されている。図1-1 に、MAMuG加速器とSINGAP加速器の概念図を示す。どちらの方式も静電加速であるが、 SINGAP 加速器では、負イオン源で生成・引出された負イオンを前段加速電極で 60 keV まで加速した後、前段加速電極と単孔の接地電極間の1段ギャップにおける 940 kV の電 位差で合計1 MeV まで加速する。これに対し、MAMuG 加速器は多孔を持つ4枚の中間 電極と接地電極を有し、各電極間にかけられた 200 kV の電位差により5段で1 MeV まで 負イオンを加速する。SINGAP は単純な構造であり、電源や冷却水配管等の簡素化が図れ るという利点がある反面、加速中に負イオンからのストリッピング電子や負イオンが前段 加速電極に衝突して生成される2次電子は発生した箇所から接地電極までの電位差に相 当するエネルギーで加速され、単孔の接地電極を抜けて加速器外へ放出されるという問題 がある。これらの電子は加速器下流のビームライン機器への熱負荷の原因となる。他方、 MAMuG 加速器では5段加速で SINGAP と比べ構造は複雑となるが、加速中に発生した電 子はその大部分が中間加速電極や接地電極に衝突して失われるため、高エネルギーに加速 される電子が少なく、さらに加速器外へ放出される電子ビームのパワーも小さいという利 点がある。

このように、両加速器にはそれぞれ利点があるが、これまで同様な条件、同様な計測器 で両者を公正に比較するには至っていなかった。そこで、ITER NBI 用加速器方式を選択 するために、両加速器の性能を同じテストスタンドで試験して直接比較する必要が生じた。 そこで ITER タスクとして SINGAP 加速器を原子力機構の MeV 級イオン源試験装置に取 り付けて、MAMuG 加速器と同じ電源、計測設備を用いて同条件の下で試験を行い、両加 速器の性能を直接比較し、評価した。SINGAP 加速器の試験は CEA カダラッシュ研究所 から述べ5人の参加者と共に2回の期間に分けて実施された。1回目は 2007 年 8 月から 11 月、その後試験結果を受けて改良を行い、2回目の試験は 2008 年 2 月から4 月にかけ て行われた。本稿は、これらの試験結果と両加速器の比較について纏めたものである。



-2 -

2 試験装置

2.1 SINGAP 加速器

図 2-1 に、MeV 級イオン源試験装置⁴⁾に取り付けた MAMuG と SINGAP 加速器の比較 を示す。SINGAP 加速器では、MAMuG における中間加速電極(A2G-A4G)を取り除き、接 地電極を矩形の単孔にした構造を持っている。オリジナルの設計では SINGAP 加速器の前 段加速電圧は 60 kV であるが、本試験では 200 kV (1 MeV 加速時)に変更した。これにより、 MAMuG 加速器用の 800 kV 電位に前段加速電極を接続することができ、新たな電源を必 要とせず試験を行うことができる。この変更に伴い、引出し電極 – 前段加速電極間のギ ャップを 90 mm に変更した。

加速器頂部の KAMABOKO 型負イオン源で生成された負イオンは、3x5の格子状に配 列された計 15 個の穴から引出され、200 kV で前段加速される。図 2-2 に前段加速電極及 びその支持枠の写真を示す。電極及び支持枠の材質は、それぞれ銅、及びステンレスであ る。前段加速電極は多孔を持ち、各孔の直径は ol6 mm である。電極は水冷され、その支 持枠にはガス抜け用の穴が多数あけられている。前段加速電極裏面には、Kerb と呼ばれる ビーム集束のための湾曲電界を形成する補助電極板が取り付けられる。図 2-3 に前段加速 電極の裏面の写真を示す。Kerbの材質はアルミ合金である。前段加速された負イオンは、 前段加速電極を通過後、接地電極との電位差で1MeVまで加速される。図2-4には、接地 電極及びその支持枠の写真を示す。接地電極は、114 x 106 mm の矩形の単孔を持ち、前段 加速電極と同様に水冷されている。接地電極支持枠の端部には、写真に示す通り電界緩和 リングが取り付けられている。これは、エッジ部を保護して電界集中を緩和するのみなら ず、接地電極の端部で加速電界が湾曲してビームが偏向することを防ぐ役割も担っている。 前段加速電極と接地電極間のギャップは1回目の試験では295 mm、2回目の試験では後 述するようにビームの過集束を補正するために 307 mm に変更された。これらの電極間距 離や Kerb の構造はビーム光学上非常に重要であり、ビーム軌道計算結果⁶⁾に基づいて決 定された。

加速器は、直径 1.8 m、高さ 0.33 m のガラス繊維強化プラスチック(FRP) 製絶縁管を 5 段積み重ねて構成した真空容器内に保持されている。各段には FRP 内面の陰極 3 重点に おける電界集中を緩和する大型電界緩和リング⁵⁾や、ビーム・電子が直接 FRP 内面を見込 むことを防止するためのビームシールドが取り付けられている。これらの FRP や電界緩和 リングは MAMuG の試験と同じものを使用した。

2.2 電流及びビーム分布計測

加速した負イオンの電流値は以下の2つの方法で計測した。1つは銅製の慣性冷却カロ リーメータによる方法である。180 mm x 180 mm x 6 mm^tの熱的に絶縁された銅板にビーム を照射し、その温度上昇を熱電対で計測してビーム入射パワーを算出し、電流値を評価す る。もう一つの方法は一次元 CFC 材を利用する方法である。図 2-5 に CFC 製ターゲット の写真を示す。140 mm x 140 mm x 10mm¹の東洋炭素(株)製1次元 CFC 板にビームを照 射し、板表面の温度上昇を赤外カメラで計測して入射パワーを算出する。CFC 材の繊維方 向はビーム照射方向に平行であり、横方向の熱拡散は非常に小さい。このため、ビーム照 射直後の IR カメラ像(フットプリント)はビーム分布を反映したものとなる。このよう に、電流値の精度は熱電対で温度を計測する銅製カロリーメータによる方法が優れるが、 一次元 CFC 材を使う方法ではビーム分布の情報が得られるという利点がある。MeV 級イ オン源試験装置のビームラインに設置してある銅製カロリーメータの裏面に一次元 CFC 製ターゲットを取り付け、ターゲットを反転させることにより真空を破ることなく両方の 計測を行うことができるようにした。

2.3 電子偏向磁石と電子ダンプ

後述の通り、一回目の試験では多量の電子が負イオンと共に加速されていることが判明 した。このため、ビーム電流計測用のカロリーメータには負イオンと共に電子も入射し、 正確な負イオン電流を評価することが困難であった。そこで、2回目の試験では接地電極 下流に磁石を取り付けて電子ビームを偏向させ、電子ビームダンプに入射させることとし た。図 2-6 に接地電極に取り付けた磁石ケースの写真を示す。ケースには 120 mm x 9.2 mm x 5.4 mm の SmCo 製永久磁石を挿入する。磁石の位置は接地電極の下流 150 mm であり、 2つのケース間の距離は 160 mm である。この磁石が作る磁場強度の分布を図 2-7 に示す。 磁石により電子ビームは 450 keV で 50 mrad, 700 keV で 33 mrad 偏向する。一方、負イオ ンビームの偏向は、450 keV で 2.2 mrad, 700 keV では 1.5 mrad である。磁場により偏向を 受けた電子ビーム軌道を加速器、ビームラインと共に図 2-8 に示す。図 2-8 に示すとおり、 偏向された電子ビームは下流のビームラインに設置した 2つのビームダンプに入射する。 電子ビームダンプIIは、ゲート弁のすぐ真上に設置され、厚さ 2mm, 重量 3.2 kg の銅板 である。電子ビームダンプIIはカロリーメータの上部 250 mm の位置に設置され、200 mm x 170 mm x t2 mm の銅板である。加速した負イオンビームはこれらのダンプの影響を受け ることなく電流値計測用カロリーメータに入射する。



図 2-1 SINGAP と MAMuG の比較



図 2-2 前段加速電極と支持枠







図 2-4 接地電極と支持枠



図 2-5 CFC 製ターゲット



図 2-6 電子偏向用磁石



図 2-7 電子偏向磁石による磁場強度分布



図 2-8 電子偏向磁石、電子ビームダンプと電子軌道

3 SINGAP 加速器の耐電圧

3.1 コンディショニング履歴

SINGAP 加速器を MeV 級イオン源試験装置に取り付けて真空引きした後、耐電圧コン ディショニングを開始した。コンディショニングの方法は、MAMuG 加速器と同様に行っ た。すなわち、

- (1) 昇圧は1kV刻みに行う。
- (2) 昇圧時のガス圧増加や暗電流・X線の発生を注意深くモニターし、これらの発生が あった時は昇圧を止め、元のレベルに戻るまで待つか、あるいは降圧する。
- (3) ガス圧や暗電流・X線が元のレベルに戻れば、再度昇圧する。
- (4) 放電破壊が生じた際には 20~50 kV 程度低い電圧から再スタートし、元の電圧に戻るか、ガス放出等が生じるまで数 kV 刻みで昇圧する。

上記の方法でおこなった SINGAP 加速器のコンディショニング履歴を図 3-1 に示す。比較のために、MAMuG 加速器のコンディショニング履歴も同図に示した。SINGAP 加速器では、2回の試験でコンディショニングの進展に差は見られず、120時間のコンディショニングで得られた最高到達電圧は 572 kV であった。この特性は、以前に試験を行った単段単孔加速器の耐電圧特性⁷⁰と極めて似ていることがわかった。図 3-1 中、黒丸で囲まれたデータは、水素ガス導入時の耐電圧である。水素ガス導入により耐電圧は向上し、SINGAP 加速器では 0.25 Pa の圧力で 800 kV まで保持可能であるが、120時間のコンディショニングでは加速器の定格である 1MV は保持できず、到達電圧は飽和する傾向にある。 一方、MAMuG 加速器では、60時間のコンディショニングで 757 kV まで到達し、さらに水素ガスを 0.2 Pa 導入することにより、定格である 1 MV を保持することができる。また、コンディショニングに要する時間も MAMuG のほうが短い。

耐電圧のガス圧依存性を調べた結果を図 3-2 に示す。SINGAP と MAMuG 加速器では同様なガス圧依存性を示し、~0.2 Pa の水素ガス導入で最大の耐電圧が得られる。それより低いガス圧領域では、MAMuG 加速器のほうが SINGAP 加速器に比べ、全領域で 200 kV程度高い。また、0.4 Pa 以上の領域ではグロー放電により耐電圧は急激に低下する。以上の結果から、耐電圧性能は MAMuG 加速器が優れることが明らかとなった。

3.2 クランプ理論からの予測

真空下での金属ギャップ間の放電はクランプ理論に従うことがよく知られている。すなわち、Vを保持電圧、dをギャップ長とすれば、

 $V = V_0 x d^z \qquad (1)$

と表せる。渡邊らは銅製近似ロゴスキー電極を用いて真空下における絶縁破壊電圧を実験的に調べた。その結果、絶縁破壊電圧はクランプ理論によく従い、Z=0.5 – 0.6 となることを示した⁸⁾。渡邊らの実験は 0-50 mm のギャップ長に対してのものであったが、得られたデータをさらに長ギャップへ外挿すれば、図 3-3 が得られる。安定な保持電圧として Z=0.5 を仮定すれば、SINGAP 加速器における電極ギャップ 307 mm (前段加速 – 接地電極間)では、保持電圧は 600 kV となり、耐電圧試験で得られたガス導入無しでの最高到達電圧 (572 kV) によく一致する。一方、MAMuG では最大の電極間距離が 104 mm であり、その時の保持可能電圧は 370 kV となり、1 段あたりの定格である 200 kV は十分保持可能と考えられる。クランプ理論が 300 mm もの長ギャップに適用できるかどうかはデータが無く不明ではあるものの、この結果は SINGAP では 1 MV 保持が困難であることを示唆している。



図 3-1 SINGAP 加速器のコンディショニング履歴



図 3-2 耐電圧のガス圧依存性



図 3-3 クランプ理論の外挿

4 SINGAP 加速器でのビーム加速

4.1 ビーム加速試験(1回目)

耐電圧コンディショニングの終了後、引き続きビーム加速試験を開始した。プラズマ電極にマスク板を設置し、3x5の格子状に配列した計15個の孔からビームを引き出し、加速する。負イオン生成を促進するために、負イオン源にはセシウムを添加した。アーク放電を繰り返し点孤して負イオン源ソースチャンバーを放電洗浄するとともに、低電流のビームを引き出し・加速して加速器のコンディショニングを行った後、負イオン源に取り付けた Cs オーブンを~200℃まで昇温して Cs を導入した。

試験は前述のとおり2回の試験期間に分けて行われたが、1回目の試験で得られた負イ オンビームのフットプリントを図4-1 に示す。加速電圧600 kV,引出電圧4.8 kV にてアー クパワーを10~20 kW まで変化させたが、計15 個含まれるビームレットを区別すること はできず、ブロードなピークが観察されるのみであった。図4-2 は、加速電圧600 kV,ア ークパワーを20 kW に固定して、引出電圧を変化させた時のビーム分布の変化を示す。同 様に、個々のビームレットは観察されず、1/e 半値幅を算出すると68 mm であった。2 個 のビーム引出孔中心間隔は21 mm であることから、1 列(5 個)ではビームが偏向なく 直進すれば84 mm となるはずである。しかしながらビーム幅がそれより狭くなっている ことから、ビームが過集束されていることがわかった。その原因を検討した結果、引出電 極裏面のエッジ部における段差による湾曲電界でビームが予想以上に集束されているた めであることが判明した。この過集束を修正するために、2 回目の試験では Kerb の高さ を 33 mm から 21 mm へ変更し、Kerb による電界の湾曲の度合いを低減することとした。

また、1回目の試験結果からは、SINGAPでは予想以上に電子加速量が多いことがわかった。図43にはビームラインのガス圧を変化させた時の加速電流(I_{acc})、負イオン電流(I_H)、 第一加速電極電流(I_{AIG})を示す。SINGAP加速器、及びMAMuG加速器を同一の条件(加速電圧 600 kV,引出電圧 4kV,アークパワー20 kW)で比較した。ガス圧は、下流のビームラインにおけるガス圧である。加速電流(I_{acc})は電源電流であり、接地電極を抜けて加速器外へ出る全ての電流を含む(図 2-1 参照)。第1加速電極電流(I_{AIG})は、SINGAP加速器では前段加速電極、MAMuG加速器では一枚目の中間電極(800 kV 電位)に流れる電流である。 電極へ負イオンや電子が衝突した時には正極性の電流、電極から2次電子が放出された場合には負極性の電流として計測される。SINGAP加速器では、ビームラインのガス圧増加に伴い、I_{acc}と I_{AIG}の負極性の電流が急激に増加する。これは、ガス圧増加に伴って、大量の2次電子が前段加速電極で発生・加速され、加速器外へと流出しているためであると考えられる。2次電子の発生機構については4.3節で後述するが、ガス圧増加により加速器低に衝突して2次電子が発生していると推測される。MAMuG加速器においては、ガス 圧増加によりストリッピングが増加して負イオン電流が減少するものの、I_{acc}や I_{AIG}は SINGAP で見られるような急激な増加はない。このように、SINGAP では電子加速量が大 きく、ビームラインの下流でカロリーメータにて計測する負イオン電流値を過大に評価す る可能性が高い。そこで、2回目の試験では2.3節で示した電子偏向磁石と電子ビームダ ンプを取り付け、電子の軌道を曲げることにより正確な負イオン電流を評価することとし た。



図 4-1 1回目の試験期間中に得られた SINGAP ビームのフットプリント。加速電圧 600 kV, 引出電圧 4.8 kV。



図 4-2 SINGAP ビームのプロファイルの引き出し電圧依存性



図 4-3 SINGAP および MAMuG での Vacc, Iacc, IA1Gのガス圧依存性

4.2 ビーム加速試験(2回目)

2回目のビーム加速試験ではビームの過集束を修正するために Kerb の高さを変更する と共に、加速器出口に電子偏向磁石を取り付けた。1回目の試験と同様に加速器の耐電圧 コンディショニングの後に Cs を導入し、ビーム加速を行った。図 4-4 に2回目の試験で 得られたパービアンスがマッチしたビームのフットプリントの一例を示す。3x5の格子状 に配列したビーム孔から引き出した 15 個のビームレットを明瞭に観察できた。図中、x 方向にビームレットが3個ずつ互い違いにずれているのは、引出電極内の電子抑制磁石に よる磁場でビームが偏向を受けるためである。得られたフットプリントは、図 4-5 に示す ビーム軌道計算からの予測^のとほぼ一致しており、2回目の試験ではビームの過集束が修 正されて、ビーム光学設計通り負イオンが加速されていることが確認された。また、図 4-4 で得られたビームプロファイルからガウス分布を仮定してフィッティングを行い、中央の ビームレットに対してビーム発散角を評価した結果、4.9 mrad であった。

図 4-6 に、2 回目の試験で得られたビーム電流値と加速電圧を示す。加速条件は以下の 通りである。

•	加速電圧	325 – 775 kV
•	引出電圧	2.0 - 6.5 kV
•	投入アークパワー	$5-30 \mathrm{kW}$
•	イオン源ガス圧	0.15 – 0.37 Pa
•	ビームパルス幅	0.2 s

• Cs 導入 有り

パービアンスマッチしたビームでは、最高で 626 keV, 225 mA (97 A/m²)のビームが得ら れた。さらに高い加速電圧では、わずかにパービアンスはずれているものの、672 keV, 220 mA のビームが得られている。しかしながら、これより高い加速電圧で、電圧保持が不安 定でビーム加速に困難が生じた。これは、SINGAP 加速器の無負荷耐電圧が 3.1 節で示し た通り、最高でも 800 kV に制限されるためである。このため、775 keV においてもビーム 加速を行ったが、電流値は 75 mA であった。

図 4-7 に SINGAP と MAMuG で得られた負イオン電流値の比較を示す。MAMuG のデ ータはこれまで最高性能が得られた 2007 年 3 月~5 月のキャンペーンのものである²⁾。 MAMuG では、最高で 796 keV, 320 mA (140 A/m²)、また 848 keV では 281 mA(122 A/m²)の ビームが得られており、最高性能の観点からは MAMuG の優位性が明らかとなった。



図 4-4 2回目の試験で得られた SINGAP ビームのフットプリント



Simulation 15 SINGAP beamlets 450 keV perveance match H-Contours: 104 313 522 730 939 W/cm2

図 4-5 ビーム軌道解析結果



図 4-6 SINGAP で加速した負イオン電流と加速電圧



図 4-7 SINGAP と MAMuG の性能比較

4.3 付随電子加速

前述の通り、1回目の試験ではカロリーメータで計測する負イオンに電子が混入し、正確な負イオン電流量の評価ができなかった。このため、2回目の試験では磁石を取り付けて電子の軌道を曲げることによりカロリーメータへ電子が入射することを防いだ。これにより、正確な負イオン電流、電子電流の評価が可能となった。図4-8に2回目の試験で得られた電子電流(Ie)を負イオン電流(IH)に対しプロットした図を示す。測定時の加速電圧は435 kV から 672 kV である。電子電流は加速電流(Iacc)と IH から以下の通り求めた。

(1)

電子電流(Ie˙)= 加速電流(Iacc)– 負イオン電流(IH˙)

加速電流(I_{acc})は電源電流であり、接地電極に入射するものと接地電極を抜けて加速器外 へ出る全ての電流を含む(図 2-1)。図 4-8 には比較のために、MAMuG におけるデータもプ ロットした。また、全てのデータは、パービアンスが合ったビームで計測した電子電流と 負イオン電流である。また、ビームラインにおけるガス圧は 0.087 Pa (負イオンソースの 運転ガス圧は 0.16 pa)であった。これらの条件下で、電子/負イオン比は SINGAP で 1.08、 MAMuG で 0.32 となった。すなわち、SINGAP では負イオン 1 個の加速につき、電子も同 量加速されることがわかった。また、MAMuG では SINGAP の 1/3 の電子加速量であり、 予想通り中間電極が電子の加速器外への流失を抑制していることが示唆される。これらの 結果は、ビームラインガス圧が比較的高い条件下のものである。EAMCC コード⁹による 予測では、ITER NBI でのガス圧条件(0.02 Pa)において加速器外へ放出される電子パワーは SINGAP で 7.3 MW、MAMuG では 0.8 MW と見積もられており⁶、下流のビームライン機 器、特に中性化セル入口への熱負荷が懸念される。

図49には、ソースガス圧を一定に保ち、ビームラインガス圧を変化させた時の前段加 速電極電流(I_{AIG})のアークパワー依存性を示す。加速電圧は450 kV、引き出し電圧3.5 kV にて計測した。4.1 節の場合と同じく、正の電流は負電荷(H, e)の電極への衝突、負の電流 は2次電子の電極からの放出であり、計測される I_{AIG}は両者の差を示している。通常の運 転条件では、ビームラインガス圧は0.087 Pa (ソースガス圧 0.16 Pa)であるが、ビームライ ンに取り付けたクライオソープションポンプを用いることにより、0.087 Pa ~0.013 Pa ま で変化させることができる。低ガス圧 (0.019 Pa)、低アークパワー(~5 kW)では、I_{AIG}は 負に大きな値を示す。これは、負イオン源での負イオン生成量が引出し電圧に比して充分 でなく、ビームが発散して AIG 電極に衝突し、2 次電子を発生するためである。アークパ ワーを増加させるにつれ I_{AIG}の値は減少し、最適な条件 (~25 kW) では I_{AIG}はほとんど ゼロとなる。これは、最適パービアンス下でほとんどの負イオンが AIG 電極を通過でき るためである。しかしながら、ガス圧が増加すると、最適パービアンス条件においても I_{AIG} がゼロとならない。このことは、高いガス圧下では負イオンが電極に衝突せずとも2 次電 子が放出されていることを意味している。その主な原因として考えられるのは、以下に述 べるとおり、逆流正イオンである。

加速器内において電子が生成されるプロセスには、以下のものが考えられる。

- 1) 負イオンが前段加速電極に衝突して2次電子を放出
- 2) 負イオンが加速途中にストリッピングして発生する剥離電子
- 3) 負イオンが残留ガスをイオン化して生成する電子
- 4) 加速器出口において形成されるビームプラズマから引出された正イオンや、残留 ガスのイオン化で発生する正イオンが負イオン加速電界で逆向きに加速され、前 段加速電極と衝突して2次電子を放出

これらのプロセスの模式図を図 4-10 にまとめる。SINGAP と MAMuG において、負イ オン源、プラズマ電極、引出し電極は共通で、引出し電極 – 前段加速電極間のギャップ (MAMuG では引出し電極 – 第一加速電極間)及びこのギャップ間に印加される電圧は 等しい。また、両加速器の試験は同じガス圧にて行った。従って、上記のプロセス 1)~3) による電子発生量は SINGAP と MAMuG で大差はないと考えられる。一方、4)の逆流正イ オンによる電子発生量は SINGAP >> MAMuG となる。これは、1) SINGAP の接地 電極が MAMuG に比べて大きな単孔でありビームプラズマから引出される正イオン量が 多いこと、2) SINGAP では逆流正イオンは全加速エネルギーの 4/5 のエネルギーまで加 速され前段加速電極に衝突するのに対し、MAMuG では 1/5 のエネルギーで第四加速電極 に衝突するため 2 次電子発生量は SINGAP で大きくなること、などのためである。

このような大きな電子電流のために、試験期間中に電子ビームダンプIが変形するとい う事態が生じた。図4-11に、試験期間前後の電子ビームダンプIの写真を示す。試験前に おいては、電子ビームダンプIはゲート弁上のアルミ合金製板の上に自重(3.2 kg)のみで固 定されていた。ビームの中心とダンプIのエッジの距離は 80 mm である。試験後において は図 4-11 に示すとおり、ダンプ I 自体が大きく変形するとともに、前方へ 70 mm 移動し てビームを遮っていた。図 4-12 には、試験後のダンプ I の拡大写真を示す。図中の四角で 囲んだ部分の溶融跡は、ダンプIが移動した結果、負イオンビームが入射したためである が、丸で囲んだ部分は負イオンビームが入射しえない箇所である。このため、電子ビーム による溶融跡と考えられる。2回目の試験期間ではダンプへの熱負荷を考慮してパルス幅 は 0.2 s のみに制限していたが、ショットを重ねることにより電子ビームの入射によりダ ンプIの温度が上昇してついには変形が生じ、下面との接触が失われて前方へ移動したも のと推測される。また、図 4-13 には、450 kV で加速試験を行った時の電子ビームの入射 位置を軌道計算から求めた結果を示す。ピンク丸で示されたビーム引き出し孔位置を出た 電子ビームは、磁石による偏向を受け、ダンプI上の太黒丸で示した位置に入射する。図 に示す通り、ダンプ移動中に軌道計算結果から予測される位置に溶融跡が観察される。こ れらの事実は、SINGAPの電子加速量の多さを示すものである。



図 4-8 負イオン加速時における電子加速量



図 4-9 前段加速電極電流のアークパワー依存性



図 4-10 加速器内における電子発生機構の模式図



図 4-11 試験前後の電子ビームダンプ I



図 4-12 電子ビームダンプ I の拡大写真



図 4-13 電子軌道計算から得られた電子ビームの入射位置

5 まとめ

ITER NBI 用加速器方式決定に向け、候補として提案されていた SINGAP、MAMuG の 2 方式の加速器を、原子力機構における同一のテストスタンドにおいて試験し、直接性能の比較を行った。試験の結果を表1にまとめる。

両加速器の保持可能電圧は、水素ガス導入時において MAMuG で 1 MV、SINGAP で 800 kV であることが明らかとなった。クランプ理論を外挿すると、SINGAP 加速器では ITER で必要とされる 1 MV 保持は困難である可能性がある。この耐電圧性能の差により、 MAMuG では 800 keV, 320 mA の負イオン加速に成功したのに対し、SINGAP では 672 keV, 220 mA にとどまった。

また、両加速器で負イオンと共に加速される電子量を同条件で比較した結果、SINGAP では MAMuG の 3 倍となり、その原因が負イオン加速に伴って加速器内で生成する正イオ ンが負イオン加速電界により逆流して前段加速電極に衝突し、2 次電子を発生するためで あることを示した。この結果から ITER NBI 運転条件での加速器から発生する電子ビーム のパワーを計算すると、SINGAP では 7.3 MW (MAMuG では 0.8 MW) にも達し、ビーム ライン機器への熱負荷が高くなりすぎ許容できないと判断される。

以上の結果に基づき、ITER 機構との協議を行った結果、ITER NBI 用加速器として MAMuGの優位性が確認され、MAMuG方式の採用が正式に決定された。

	MAMuG	SINGAP (at MTF)
耐電圧	1 MV with H_2 gas of 0.21 Pa	800 kV with H_2 gas of 0.25 Pa
ビーム電流	320 mA (140A/m ²) at 796 keV	220 mA (95 A/m ²) at 672 keV
電子加速量	I / I = 0.29	$I_{-}/I_{-} = 1.00$
(ガス圧 0.086 Pa)	$I_{e}/I_{H} = 0.28$	$I_{e}/I_{H} = 1.09$
発散角	5.5 mrad @750 keV ¹⁰⁾	4.9 mrad @450 keV

表1 SINGAP と MAMuG の性能比較

参考文献

- ITER EDA Final Design Report, ITER technical basis, Plant Description Document (PDD), G A0 FDR 1 01-07-13 R1.0, IAEA EDA documentation No. 24 (2002).
- M. Taniguchi, T. Inoue, N. Umeda, M. Kashiwagi, K. Watanabe, H. Tobari, M. Dairaku, and K. Sakamoto : "Acceleration of ampere class H⁻ ion beam by MeV accelerator", Rev. Sci. Instr. <u>79</u>, p.02C110 (2008).
- H.P.L. de Esch, R.S. Hemsworth and P. Massmann : "Updated physics design ITER-SINGAP accelerator", Fusion Engineering and Design <u>73</u>, p.329 (2005).
- T.Inoue, M.Hanada, S.Maeno, K.Miyamoto and Y.Ohara : "Design study of prototype accelerator and MeV test facility for demonstration of 1 MeV, 1A negative ion beam production", JAERI-Tech 94-007 (1994).
- 5) T. Inoue, M. Hanada, T. Iga, T. Imai, M. Kashiwagi, M. Kawai, T. Morishita, M. Taniguchi, N. Umeda, K. Watanabe and T. Yamamoto : "Accelerator R&D for JT-60U and ITER NB systems", Fusion Engineering and Design <u>66-68</u>, p.597 (2003).
- H.P.L. de Esch et.al., to be published in the proceedings of 25th Symposium on Fusion Technology, 15-19 Sep., Rostock, Germany.
- 渡邊、高柳、奥村、花田、井上、柏木、森下、谷口:"単段多孔型長ギャップ加速電極 による水素負イオンビームの加速" JAEA-Technology 2005-002.
- K.Watanabe, Makoto Mizuno, Yoshihiro Ohara, Masanobu Tanaka, Kazuo Kobayashi, Eiki Takahashi, and Taisei Uede : "dc voltage holding experiments of vacuum gap for high-energy ion sources", J.Appl.Phys., <u>72 (9)</u>, p.3949 (1992).
- G. Fubiani, H. P. de Esch, A. Simonin, and R. S. Hemsworth : "Modeling of secondary emission processes in the negative ion based electrostatic accelerator of the International Thermonuclear Experimental Reactor", Phys. Rev. ST Accel. Beams, <u>11</u>, p.014202 (2008).
- M.Taniguchi, T. Inoue, M. Kashiwagi, K. Watanabe, M. Hanada, T. Seki, M. Dairaku, and K. Sakamoto : "Acceleration of MeV-class energy, high-current-density H—ion beams for ITER neutral beam system", Rev.Sci.Instrum. <u>77</u>, p.03A514 (2006).

表 1. SI 基本単位					
甘木島	SI 基本ì	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表 2. 基本単位	zを用いて表されるSI組立単	立の例
和立量	SI 基本単位	
和立里	名称	記号
面	積 平方メートル	m^2
体	積 立法メートル	m ³
速さ,速し	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
面積密!	度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体 ネ	積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	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
量濃度 ^(a) ,濃」	度 モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃!	度 キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝	度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率	^(b) (数字の) 1	1
比诱磁率	^(b) (数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位			
組立量	反抗	和旦	他のSI単位による	SI基本単位による	
	和你	記与	表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立 体 牟	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^2$	
周 波 数	(ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
压力,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	$m^2 kg s^2$	
仕事率, 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	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$\mathrm{m}^2\mathrm{kg}\mathrm{s}^{-3}\mathrm{A}^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電 気 抵 扩	オーム	Ω	V/A	$\mathrm{m}^2\mathrm{kg}\mathrm{s}^{-3}\mathrm{A}^{-2}$	
コンダクタンフ	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^{3} A^{2}$	
磁 芽	(ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁東密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^2 A^1$	
インダクタンプ	ヘンリー	Η	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光 東	(ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照 度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 (f) ベクレル (d)				s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与, グレイ			J/kg	$m^2 s^{-2}$	
カーマ		G,	0/115		
線量当量,周辺線量当量,方向			J/kg	$m^2 e^{-2}$	
性線量当量,個人線量当量		~,	5/115		
<u>酸素活</u> 性	カタール	kat		s ¹ mol	

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SE接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 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である数字の1は明 示されない。
 (c)潤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)加光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)加光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (e)如火ウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。の度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM制告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{1} s^{1} = s^{1}$	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^{2} kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m kg s^{3} A^{1}$	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m^{-2} sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	${ m m}^{-3}{ m kg}^{-1}{ m s}^4{ m A}^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$	
モルエントロピー, 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 sA	
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	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	Э 9	Y	10^{-1}	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р	
10^{6}	メガ	М	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	у	

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
H	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	٥	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	-++ \= 1 +	18 (HARA 44) - (H > 1, 7, 1, m)	

表される皴値か実験的に得られるもの							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J					
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg					
統一原子質量単位	u	1u=1 Da					
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m					

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値			
バ	-	ン	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロ	- J	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	М	1 M=1852m			
バ	-	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$			
1	ッ	F	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np	ロロンドレールを目がい			
ベ		ル	В	▶ 31 単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存.			
デ	ジベ	ル	dB -	A SALE ON CALCENTS			

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポーアーズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^1 = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^1$					
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{-2}$					
フォト	$_{\rm ph}$	$1 \text{ ph}=1 \text{cd sr cm}^{-2} 10^4 \text{lx}$					
ガ ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^2 = 10^{-2} \text{ms}^{-2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガ ウ ス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe 🛔 (10 ³ /4π)A m ⁻¹					

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	名称				記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
\mathcal{V}	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				F	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
\mathcal{V}				Д	rem	$1 \text{ rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{Sv}$
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		$\overline{}$	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	x		ル	1		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系:	カラッ	ノト		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク		D	\sim	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています