

2004-007



大電流線形誘導加速器の開発研究

2004年3月

前原 直・鄭 曉東*・渡辺 聰彦*・木代 純逸*・高山 健*
堀岡 一彦*・小川 雅生*・川崎 溫*・志甫 謙

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

大電流線形誘導加速器の開発研究

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

前原 直・鄭 曉東^{*1}・渡辺 聰彦^{*2}・木代 純逸^{*3}・高山 健^{*3}・堀岡 一彦^{*4}
小川 雅生^{*4}・川崎 温^{*5}・志甫 謙

(2004年1月30日受理)

大電流線形誘導加速器の開発研究として、1995年から2002年まで東京工業大学および高エネルギー加速器研究機構との共同研究および原研の成果について報告する。

要素開発では、ファイメントコアの磁気特性を評価し、300kV-100ns のパルスで最大1kHz 繰返運転が可能であることが分かった。また高繰返化技術については、FET 素子を採用したパルスモジュレーターを開発し、2.5kV-200ns のパルスで 1MHz の開発に成功した。また電子ビームの加速実験では、低エミッタンス化電子銃により 2.0MeV-1kA の加速を達成し、イオンビームの引出実験では 120kV-200mA を実証した。線形誘導加速器の応用として、大出力発振系の開発では、BWO による 200MW の発振結果を基に、コンパクトな発振系である新たな BWO-FEL 概念設計を提案し、X バンド領域において 500MW-800MW レベルの発振系の開発に目処をつけた。今後、線形誘導加速器の応用は、核融合分野、誘導型シンクロトロン、高勾配加速器、ニュートリノファクトリ計画において進展すると考えられる。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

*1 Zhejiang 大学

*2(株) ユードム

*3 高エネルギー加速器研究機構

*4 東京工業大学

*5 埼玉大学名誉教授

Research and Development of Large Current Induction Linac

Sunao MAEBARA, Xiaodong ZHENG^{*1}, Akihiko WATANABE^{*2},
Jun-ichi KISHIRO^{*3}, Ken TAKAYAMA^{*3}, Kazuhiko HORIOKA^{*4}, Masao OGAWA^{*4},
Sunao KAWASAKI^{*5} and Makoto SHIHO

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

(Received January 30, 2004)

R&D results for a large current induction linac, which had been done from 1995 to 2002 under the collaboration with Tokyo Institute of Technology (TIT) and High Energy Accelerator Research Organization(KEK), are reported.

In element developments of induction linac, a magnetization properties of Finemet were evaluated by TIT, it was found that the repeating operation of 1kHz was possible for the induced voltage of 300kV-100ns. For a high repeating technology, a pulse modulator using FET was developed by KEK, the 1MHz operation with the output pulse of 2.5kV-200ns were performed. For a high current beam experiments by induction linac, the electron beam of 2MeV-1kA with a low emittance was accelerated by JLA. For ion beam, Cu⁺ ion beam of 120kV-200mA were extracted by TIT. For an application of induction linac, a development of a high power oscillation system had been done. With based on the BWO experiment results of 200MW at X-band, a compact oscillation system using BWO-FEL was proposed by JAER. In this system, the output power of 500-800MW at X-band is expected. By these results, rapid progress of the application, in future, is expected in a fusion field , induction synchrotron, high-gradient accelerator and neutron factory project.

*1 Zhejiang University

*2 U-DOM Co. Ltd.

*3 High Energy Accelerator Research Organization

*4 Tokyo Institute of Technology

*5 Emeritus Professor of Saitama University

Keywords: Induction Linac, JLA, Magnetic Substance, Finemet, BWO, FEL, MTX,
High-gradient Accelerator, Induction Synchrotron, Neutrino Factory

This is a blank page.

目 次

1 . 序論 -----	1
2 . 線形誘導加速器 -----	3
2.1 パルス回路の原理 -----	3
2.2 加速部誘導電界の原理 -----	6
2.3 大電流線形誘導加速器 JLA -----	7
3 . 線形誘導加速器の開発 -----	10
3.1 強磁性体の磁化特性評価 -----	10
3.2 誘導電圧波形制御 -----	13
3.3 高繰返パルスモジュレーター -----	13
4 . 電子・イオンビーム用インジェクター -----	15
4.1 電界放出型電子銃 -----	15
4.2 電子銃部の配置 -----	15
4.3 低工ミッタヌ化電子銃 -----	18
4.4 イオンビームの引出実験 -----	20
5 . 線形誘導加速器による応用分野 -----	23
5.1 大出力ミリ波マイクロ波発振 -----	23
5.2 核融合への応用 MTX 実験 -----	29
5.3 高勾配加速器 -----	32
5.4 誘導型シンクロトロン -----	33
5.5 ニュートリノファクトリ計画 -----	35
6 . まとめ -----	37
謝辞 -----	38
参考文献 -----	39

Contents

1. Introduction -----	1
2 . Induction Linac -----	3
2.1 Principle of Pulse Circuit -----	3
2.2 Principle of Induced Field at Accelerator Cavity -----	6
2.3 Large Current Induction Linac(JLA) -----	7
3 . Elements Development of Induction Linac -----	10
3.1 Evaluation of a Magnetization for a Magnetic Substance -----	10
3.2 Control of a Wave Form -----	13
3.3 High-repeating Pulse Modulator -----	13
4 . Injector Unit for Electron and Ion Beam -----	15
4.1 Field Emission Type Electron Gun -----	15
4.2 Position of Electron Gun in Injector Unit -----	15
4.3 Low-emittance Electron Gun -----	18
4.4 Ion Beam Experiment -----	20
5 . Application of Induction Linac -----	23
5.1 High Power Oscillation of Millimeter-wave and Micro-wave -----	23
5.2 Microwave Tokamak Experiment -----	29
5.3 High-gradient Accelerator -----	32
5.4 Induction Synchrotron -----	33
5.5 Neutrino Factory Project -----	35
6 . Summary -----	37
Acknowledgement -----	38
References -----	39

1. 序論

線形誘導加速器は、強磁性体の周りに電流を流しその誘導電圧を利用して電子やイオンを加速するもので、パルス幅（数 10nsec~数 100μsec）において数 kA 級の電子やイオンビームを加速することができる。この線形誘導加速器によるビームへのエネルギー変換率が 70% を超え、レーザーの 5% レベル、RF ライナックの 20% レベルに比べ、格段に優れているのが特徴である。また大電流の電子やイオンビームを加速・制御することにより、大出力の高周波源やエネルギードライバーとして機能することから、核融合分野、加速器分野、地球環境分野、宇宙分野においていろいろな応用が検討されてきた。これらの分野において応用するためには、線形誘導加速器として、強磁性体の磁化特性評価、波形制御および高繰返し技術の確立およびコンパクトな発振システム開発が必要である。

原研・核融合工学部では、トカマクプラズマ閉じ込め装置における電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) のパワーソース及び大出力ミリ波マイクロ波の応用研究の開拓を目指して、1988 年から 1 号機としてアモルファス金属を強磁性体として採用した Large Ampere Experiment-1 (LAX-1) 線形誘導加速器 (1MeV, 3kA, 100ns) を開発し、大出力のミリ波マイクロ波の発振研究を開始した。45GHz 帯自由電子レーザー (Free Electron Laser :FEL) の発振研究では、線形ウイグラー中のビーム軌道の発散を抑えるために、磁極面を双曲面 (Focusing Wiggler) にすることによりビーム伝送の安定化に成功し、1993 年に 1 MeV·200A の電子ビームを用いて 10MW 発振出力および空間成長率 65 dB/m の当時世界最高の高利得を達成した [1,2]。

一方、高エネルギー加速器研究機構では、素粒子物理の実験に用いる加速器に FEL で得られる大出力マイクロ波を応用し、高勾配加速器の開発を目指す手段として発振研究が進められた。線形誘導加速器 (1.6MeV, 600A, 80ns) にイオンチャンネルガイドと言う新しいコンセプトを用いて、1994 年に 1.5MeV·600A の電子ビームを用いて 9.4GHz 帯において 100MW の FEL 発振出力に成功した。また翌年には集群させた電子ビーム (Pre-bunched electron beam) を用いて、空間成長率 78 dB/m の高利得および発振出力 150MW を達成した [3,4]。

これらの結果を基に原研では、1995 年からファインメット (Fe 基超微結晶質軟磁性合金) を磁性体として採用した大電流線形加速器 JLA (JAERI Large current Accelerator :2MeV-3kA, 100ns) の開発を進めるとともに、1997 年からコンパクトな大出力マイクロ波の発振研究を目指して LAX-1 線形誘導加速器 (1MeV, 3kA, 100ns) による後進波発振 (Backward-Wave Oscillator) の研究を開始した。その結果 2000 年に周波数 9.8GHz の BWO 実験により国内最大出力の 210MW を達成するとともに、BWO におけるビームバンチングを世界で初めてストリーカカメラで観測すること

に成功した[5-7]。一方、1997 年に 2.5MeV の大電流線形誘導加速器（JLA）と高エネルギー加速器研究機構の 1.6MeV 線形誘導加速器と組合せた 4MeV-1kA 級の大電流電子ビーム加速器に成功した。また慣性核融合のエネルギードライバーとして線形誘導加速器を用いたイオン加速の研究を行っている東京工業大学と強磁性体の磁化特性評価やイオン加速制御に関する共同研究を開始し、国内では唯一、大学及び国立研究機関との共同研究で本格的な研究が始まった。

本報告書は、大電流線形誘導加速器の開発として、2002 年までの共同研究を含めた研究成果を総括したものである。第 2 章に線形誘導加速器について、パルス回路の原理と加速部誘導電界の原理について解説し、2.5MeV の JLA 大線形誘導加速器について紹介する。第 3 章では、線形誘導加速器の開発として重要な、強磁性体の磁化特性評価、誘導電圧波形制御および高繰返パルスモジュレーターの研究結果について記述する。第 4 章では、線形誘導加速器を大電流の電子やイオンビームのインジェクターとして機能させた例として、電子銃の設計と実験結果を記述し、イオンの引出実験についても紹介する。第 5 章では、線形誘導加速器による応用分野として、大出力ミリ波マイクロ波発振として自由電子レーザー（FEL）および後進波発振（BWO）の実験結果と X バンド FEL の設計について、また核融合への応用として世界で唯一、線形誘導加速器による 140GHz の FEL 発振パワーを使ったトカマクプラズマに入射し、電子サイクロトロン加熱（ECH）実験を行った日米協力研究の MTX(Microwave Tokamak eXperiment) 実験について紹介する。また線形誘導加速器を採用して低コスト化およびコンパクト化を目指した高勾配加速器の計画を紹介し、高エネルギー加速器研究機構で本格的な実証研究が始まった誘導加速シンクロトロンとニュートリノファクトリー計画について紹介する。

2. 線形誘導加速器

線形誘導加速器は、パルス回路部で形成されたパルス電流をトロイダル状の強磁性体コアの一次側に供給し、磁性体に励磁された磁束を打ち消す方向に誘起する電界をコア中心軸上に発生させる。この誘導電界を軸方向に多段に並べて、ビームの発生および加速を行う。通常、一つのコアで発生される誘導電界は、パルス幅 50~120nsにおいて 100keV~250keV 程度である。大電流線形誘導加速器 JLA (JAERI Large current Accelerator:2.5MeV-3kA,100ns) は、強磁性体として採用したファインメット (Fe 基超微結晶質軟磁性合金)・コア4段から構成されるビーム引出しのためのインジェクターユニット (1.25MeV-3keA) とビームを追加速するための追加速ユニット (1.25MeV-3kA) から構成される[8]。本章では、線形誘導加速器の概要を説明するためにパルス回路の原理、加速部誘導電界の原理および大電流線形誘導加速器 JLA について解説する。

2.1 パルス回路の原理

図 2.1 に線形誘導加速器で用いられるパルス回路を示す。回路は直流電源、1 次コンデンサー、トリガースイッチ、昇圧トランス、中間蓄積コンデンサー、パルス形成線路、磁気スイッチから構成される。

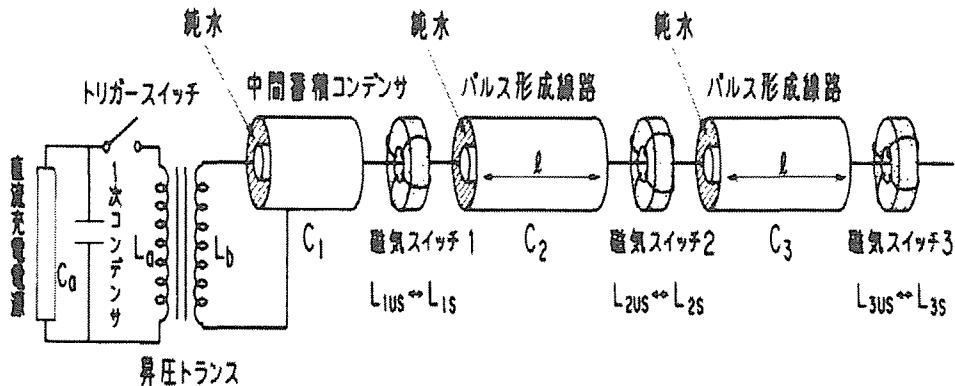


図 2.1 パルス回路の構成図

直流電源により 1 次コンデンサーに充電した後、トリガースイッチを放電させると C_a に溜まっていたエネルギーは C_1 に共振的に転送されて中間蓄積コンデンサーが充電される。中間蓄積コンデンサー及びパルス形成線路は純水を誘電体として使った同軸線路であり、耐電圧特性に優れたコンデンサーである。

まず初めに共振充電の動作原理を説明する。下図 2.2 に示すようなインダクター L と 2 つのコンデンサー C_0 と C_1 の回路を考える。キルヒホッフの法則により電圧の関係は、

$$\frac{1}{C_1} \int i dt + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_0} \int i dt = 0 \quad (2.1)$$

であり、時間で微分すると

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{C_T} i = 0 \quad (2.2)$$

ここで $C_T = C_0/C_1$ (並列コンデンサーの合成値) である。解は、

$$i(t) = A \cos \frac{t}{\sqrt{LC_T}} + B \sin \frac{t}{\sqrt{LC_T}} \quad (2.3)$$

初期条件として

$$i_{t=0} = 0 \text{ と } \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V}{L} \text{ を選ぶと、}$$

電流は、

$$i(t) = V \sqrt{\frac{C_T}{L}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC_T}} \quad (2.4)$$

となる。この式は C_0 に蓄えられていた電荷が C_1 に移動し、時間

$$t = \pi \sqrt{LC_T} \quad (2.5)$$

後に、 C_0 の全電荷が C_1 に移動することを表している。その後電荷は逆に C_1 から C_0 へ移動し始める。このようにして周期的に繰り返す共振が起きる。

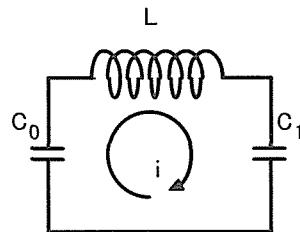


図 2.2 共振回路

ここではインダクタンス L が変化しないと考えが、強磁性体にコイルを巻いてインダクターとする場合、コイルの電流によって作られる磁場は、ある電流値以上になると飽和し始める。磁束と電流との比例係数であるインダクタンス L は、

$$\Phi = LI \quad (2.6)$$

であり、飽和することによりインダクタンスが小さくなり、充電時定数を小さくなる。これをを利用して多段式にして移動時間を短縮していくことができる。この方式を飽和型磁気パルスコンプレッサーと言う。

磁気スイッチは、磁性体の未飽和時と飽和時のインダクタンスの値が大きく異なる点を利用した可飽和リクトルと呼ばれるものである。磁気スイッチとして用いる場合、直流バイアスを流しておき、図 2.3 の B-H ループの A 点から動作が始まる。A 点から B 点の間は未飽和領域であり、インダクタンスを L_{us} とし、B 点から C 点の飽和領域のインダクタンスを L_s とする。アモルファス金属では、 L_{us} は L_s の 1000 倍程度になる。

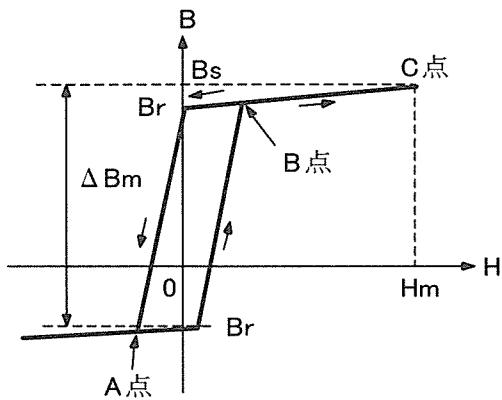


図 2.3 B-H ループ

図 2.4 に飽和型磁気パルスコンプレッサーの回路を示す。S は時間 $t=0$ に ON になるスイッチであり、 L_0 は C_0 に蓄積されている電荷を C_1 へ共振充電するためのインダクタンスである。また L_1 と L_2 は、それぞれ充電中に飽和することによって、 C_2 、 C_3 への充電時定数を決めるための可飽和リクトルである。

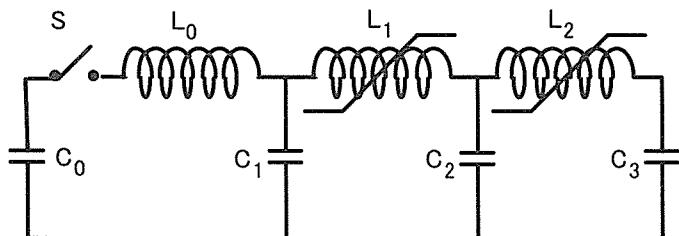


図 2.4 飽和型磁気パルスコンプレッサー回路

普通は $C_0=C_1=C_2=C_3=C$ と同一容量を設定する。可飽和リクトル L_1 は材料、大きさ、コイルの巻数により最適に設計し、 C_1 の両端電圧が最大になる時間

$$t_{0 \rightarrow 1} = \pi \sqrt{L_0 \frac{C}{2}} \quad (2.7)$$

の電圧積分となる。従って

$$(\Delta BAN)_{L_1} = \pi V \sqrt{L_0 \frac{C}{2}} \quad (2.8)$$

の関係を満足するように、大きさ、巻数を設計する。 L_1 は飽和することによりインダクタンスが急激に減少し、 C_1 から C_2 への充電時間が

$$t_{1 \rightarrow 2} = \pi \sqrt{L_1^S \frac{C}{2}} \quad (2.9)$$

と短縮される。ここで L_1^S は飽和した時の L_1 のインダクタンスである。さらに L_2 に関しても

$$(\Delta BNA)_{L_2} = \pi V \sqrt{L_2^S \frac{C}{2}} \quad (2.10)$$

の関係が成り立つように大きさ、巻数を設計すると C_2 と C_3 への充電時定数が

$$t_{2 \rightarrow 3} = \pi \sqrt{L_2^S \frac{C}{2}} \quad (2.11)$$

と圧縮される。JLA 線形誘導加速器では、パルス電源により 25kV, 1.6μsec のパルスをパルストラnsにより 250kV に昇圧し、250kV, 160ns のパルスに圧縮している。

2.2 加速部誘導電界の原理

図 2.5 a) に示すようにフェライト等できたトロイダル状の磁性体に 1 次巻線と 2 次巻線に 1 ターン巻いてあるとすると、1 次側に電圧パルスが印加されると磁性体内部の磁束が変化し、2 次側には磁束の変化量にともない

$$\int E dl = - \int \frac{\partial \Phi}{\partial t} ds \quad (2.12)$$

で表される電圧が発生する。ここで E は電界強度、 Φ はコア一中の磁束である。

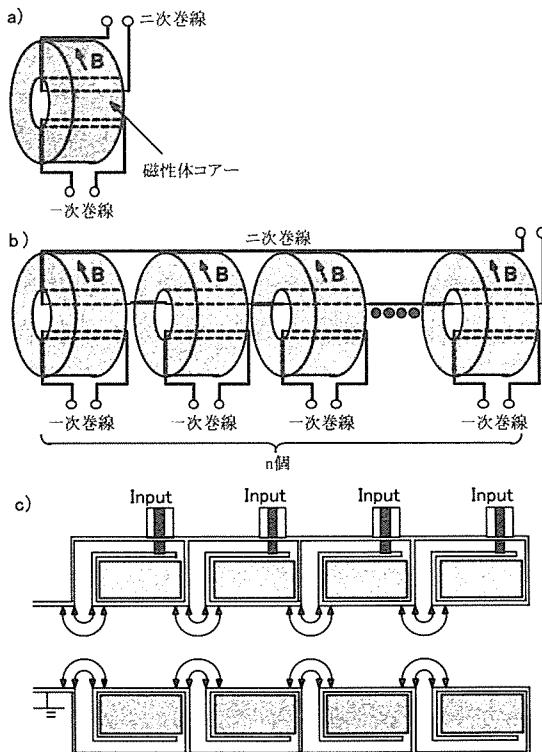


図 2.5 加速部の概念図

次に図 2.5 b に示すように磁性体が n 段並べられた場合を考えると、すべての磁性体の 1 次側にそれぞれのパルス電圧を印加した場合、2 次側に発生する電圧は、

$$\oint \mathbf{E} dl = -n \int \frac{\partial \Phi}{\partial t} ds \quad (2.13)$$

から n 倍となる。すなわち磁性体の個数を増やしただけ電圧が重畠される。また巻数 1、巻線比 1 : 1 のトランスであるため、加速器側のインピーダンスは入力パルス電源のインピーダンスとほぼ同じに低くできるため大電流の加速器に適している。実際には図 2.5 C に示すように磁性体を金属のケースに包み、ケースにパルス電流を流して磁性体のインダクタンスによりギャップ間に誘導電界が励起させる。装置の外周は接地電位であることからビーム制御の観点からも都合がよく線形誘導加速器の特徴の一つと言える。

2.3 大電流線形誘導加速器 JLA

大電流線形誘導加速器 JLA は、大きく分けて初期パルス発生装置、パルス成形ユニットと加速器ユニットから構成される。初期パルス発生装置は、コンデンサー ($7.2\mu F$) と乾燥空気によるギャップスイッチから構成され高電圧直流電源 (30kVDC-20mA DC) により充電される。またパルス成形ユニットは、図 2.6 に構成図を示すようにパルストラ ns (巻線比 1:10)、中間蓄積コンデンサー (300kV, 30nF)、磁気スイッチ 1 (鉄系アモルファス AC10 (TDK 製))、パルス形成線路 (特性インピーダンス 3.1Ω , コンデンサー可変)、磁気スイッチ 2 (鉄系アモルファス AC10 (TDK 製))、伝送線路 (特性インピーダンス 3.1Ω)、磁気スイッチ 3 (ファインメット FT-1H (日立金属製))、パルストラ ns (巻線比 1 : 2) から構成される。

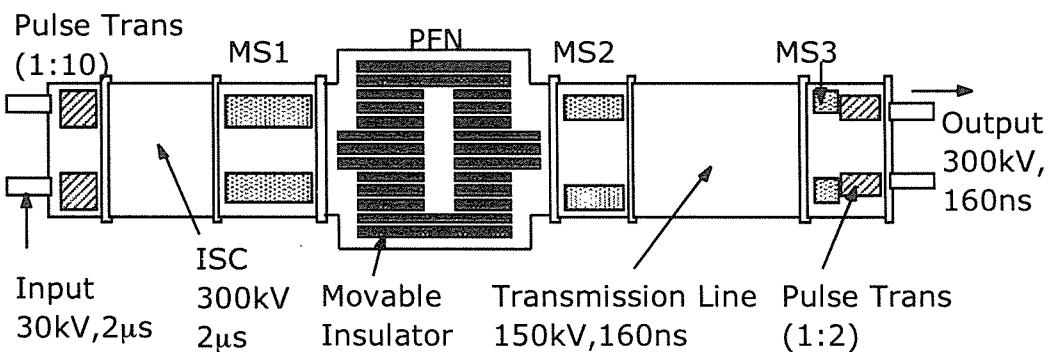


図 2.6 JLA パルス成形ユニットの構成図

パルス成形された出力 (300kV, 100ns) は、特高ケーブル (特性インピーダンス 50Ω 、ケーブル長 10m) により加速ユニットは、構成を図 2.7 に示すように電子を引出すためのインジェクターユニット (1.25MeV-3kA)、カソードおよびアノードを設置す

るダイオードチャンバー、カソードから引出されたビームの追加速を行う追加速ユニット(1.25MeV)から構成される。それぞれのユニットには、 $\phi 580 \times \phi 320 \times 25.4\text{mm}$ のファイメット(鉄をベースとした超微結晶質軟磁性合金)を磁性体として採用している。またそれぞれのユニット内部及には、縦磁場を励磁するソレノイドコイルが設置されており、ビームをガイドするために最大4kGの磁場を励磁することができる。

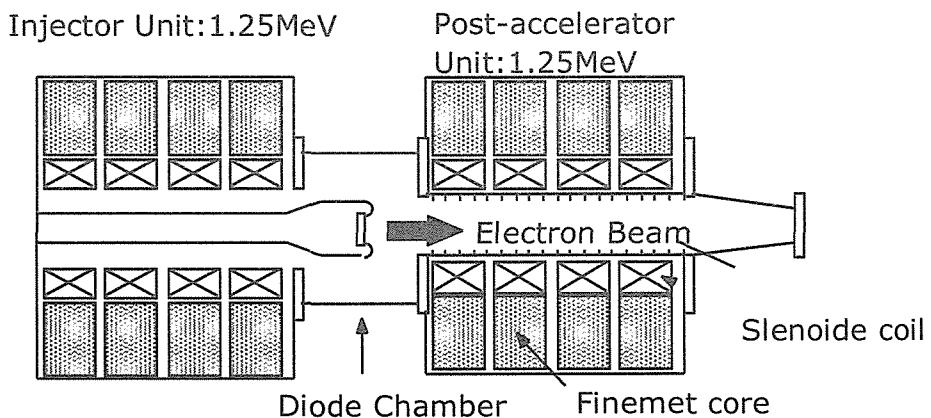


図 2.7 加速ユニットの構成図

図 2.8 に JLA 線形誘導加速器の外観図を示す。左側の青色のボックスが初期パルス発生装置であり、中央にある長さ 5.4m のものがパルス成形ユニット、右側の長さ 3.9m のものが加速ユニットである。この加速器は、最大エネルギー 5MeV-3kA, 160ns で 5 分に 1 ショットで設計された厚み 50cm のコンクリートで囲まれた地下遮へい室に設置された。

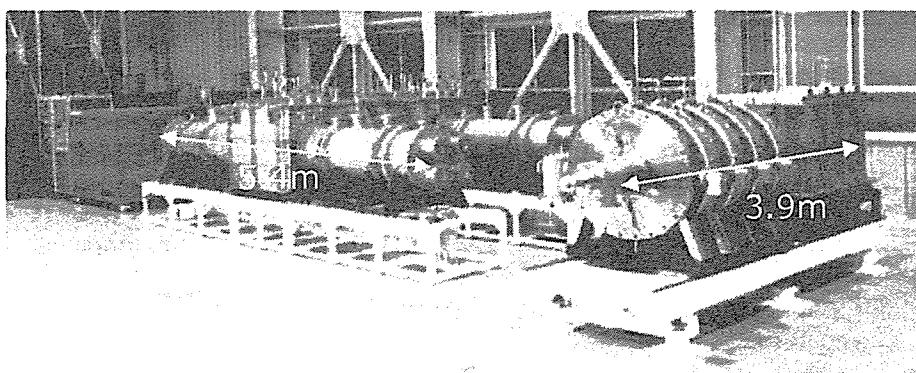


図 2.8 JLA 線形誘導加速器の外観図

図 2.9 に JLA 線形誘導加速器の電圧波形と電流波形を示す。電圧波形は、インジケーターユニットと追加速器ユニットの 1 段の誘導電界を示し、誘導電界を硫酸銅抵抗で分圧した波形である。ビーム波形の後方において電圧ドロップが生じていない

のが特徴であり、PFN部においてC容量を調整することにより実現した。電流波形は、インジェクターユニットでのダイオード電流と追加速器ユニット最終段での電流である。

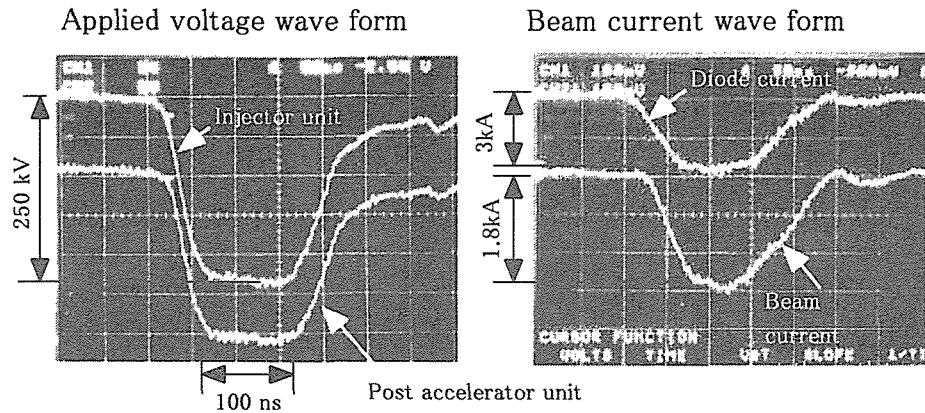


図 2.9 大電流線形誘導加速器 JLA の電圧波形と電流波形

3. 線形誘導加速器の開発

誘導型加速器を用いると、4MeV程度の低エネルギーでは kA 級の大電流粒子ビームを高効率で発生・加速できる。しかしながら従来の大電力誘導加速器は、繰り返し能力やパルス波形制御性の点で、解決すべき課題が数多く残っている。またイオン加速に関しては、低加速電圧で大電流の粒子ビームは自己電磁場に支配されるため加速過程の制御や伝送が困難であり、高フラックス・イオン源[9,10]や空間電荷効果の抑制をはじめ電子加速と比較してイオン加速には格段に多くの課題がある[11]。

電子およびイオンに関わらず線形誘導加速器の共通の大きな課題は、高繰返動作を制限する強磁性体の磁化特性評価、加速電圧の波形制御と強磁性体へ供給するパルス回路の高繰り返し動作技術の確立である。本章では、東京工業大学との共同研究を通じて達成された成果を中心に、強磁性体の磁化特性評価、誘導電圧波形制御、高繰返パルスモジュレーターについて述べる。

3.1 強磁性体の磁化特性評価

電磁誘導によって磁性体の周囲に誘起される電圧 V は、

$$V = \int E \cdot dl = \int \text{rot} E dS = - \int (\partial B / \partial t) dS \quad (3.1)$$

と書ける。断面積を ΔS とし均一な磁化特性を持つ磁性体を仮定すると、(1)式より誘導起電力とパルス幅 τ には

$$V \cdot \tau = \Delta B \cdot \Delta S \quad (3.2)$$

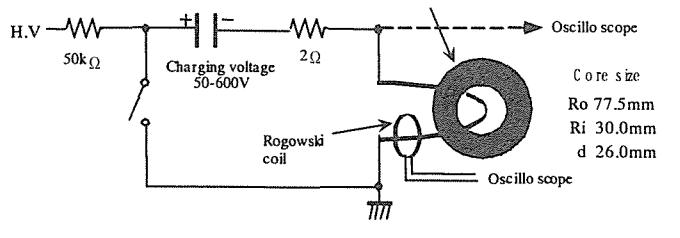
の関係がある。(3.1)、(3.2)式はビーム電流を陽には含まない。したがって、誘導加速器の加速空洞自身のビーム加速能力には電流限界は存在しないことが大きな特徴である。加速ギャップ以外には電圧が誘起されないので、静電型加速器と異なり直列多段接続が可能である。ただし、大電流ビームの空間電荷効果によるエミッターンスの増大を避けるために、ビームエネルギーに応じて電流値（パルス幅）を制御する。これが、想定されているイオン誘導加速器の基本概念である。

パルスパワー電源から供給される電力パルスを加速空洞に供給し、粒子エネルギーの増加に応じてパルス幅を圧縮（バンチング）してゆく。パルス幅の圧縮率と圧縮に伴うエミッターンスの増加は荷電粒子のエネルギーの制御性に依存するので、低エネルギー領域では、長パルスを発生でき、しかも加速電圧波形を高精度で制御できる誘導加速空洞ユニットが必要になる [11]。

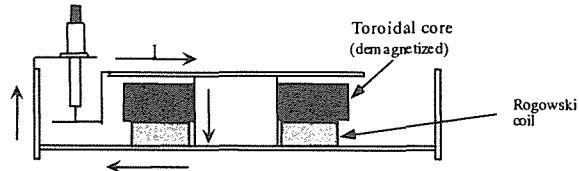
(3.1)式に示したように、誘導加速器の起電力（加速電圧波形）は磁気コアの磁束密度の変化率に依存する。また、MHz級の高繰り返し動作を実現するには、誘導加速空洞のコア損失を考慮した詳細な熱設計が必要になるため、詳細な磁化特性が不可欠である。

強磁性体としては、最大動作磁束密度 (ΔB) の高い順に、けい素鋼板(Fe-Si合金)、アモルファス合金、ファインメット(Fe-基超微結晶質軟磁性合金)、フェライト等があり、原研の1号機である線形誘導加速器(Lax-1:1MeV-3kA,100ns) Co系アモルファス合金、2号機である線形誘導加速器(JLA:2.5MeV-3kA,100ns)は、ファインメットコアが採用されている。

高精度の加速電圧制御と高繰り返し動作を実現するために、代表的な磁性体コアの磁化特性を調べた。図3.1に、磁化特性試験のための実験配置を示す。磁化特性の試験装置は、LCRで構成される放電回路とトロイダル形状の磁気コアを囲む電流駆動部とで構成されている。試験部は、浮遊インダクタンスを小さくするためにアルミ製の同軸構造の容器で囲んでいる[12]。



Schematic Diagram of Discharge Circuit



Experimental Arrangement for Pulse-Magnetization

図3.1 磁化特性試験装置

電圧・電流特性とともに、代表的な磁性体の磁化特性を詳細に調べた。磁性体の磁化特性から求めた磁化曲線と最大磁束振幅に対するコア損失の典型的な測定結果を図3.2に示す。

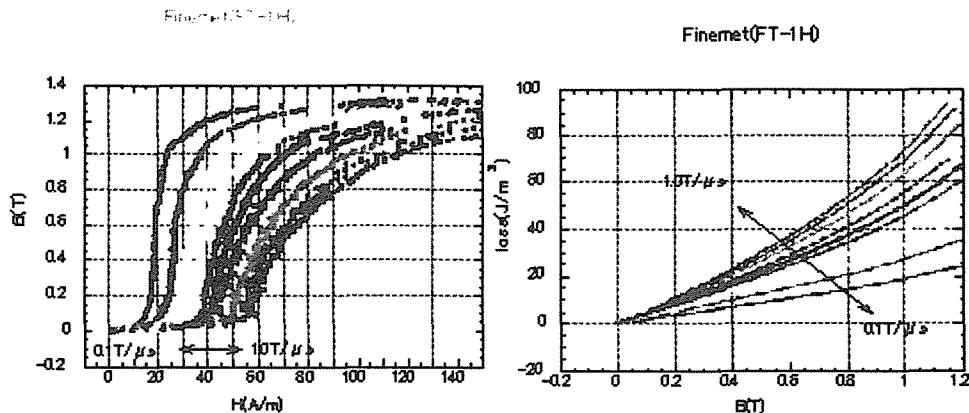


図 3.2 磁性体の磁化特性とコア損失の典型的な測定例

誘導加速モジュールに用いられる典型的な磁性体材料（コバルト基アモルファス、ファインメット）の高速磁化特性を詳細に測定し、磁束密度の変化率（ dB/dt ）をパラメータにした形に整理した磁化曲線を求めた。また、実測した磁化曲線と磁壁の移動モデルを基に、磁束変化量： ΔB 、磁束密度の変化率； dB/dt の両方に依存するコア・損失の新しいスケーリング式を導出した[13]。

磁化曲線を比較検討した結果、 $0.1 - 1.0 \text{T}/\mu\text{s}$ のパラメータ領域では磁壁の移動はバードメイン・モードとサチュレーション・ウェーブモードと呼ばれる磁化モデルの遷移領域に対応していること、磁化のスタート点によって磁化曲線が異なることはこれらの磁壁移動モデルによって説明できることを明らかにした[13]。

またパルス幅の観点から、それぞれの強磁性体を採用した場合のコアのエネルギー損失が算出された[12]。パルス幅 $1[\mu\text{s}]$ の電圧 300kV を誘導する場合、 V_T 積は 0.3 となる。コアの大きさとして内径、外形を $0.5[\text{m}]$ と $1.5[\text{m}]$ とした場合、けい素鋼板とファインメットを採用した場合、厚みは $9[\text{cm}]$ と $16[\text{cm}]$ となる。このときの磁化率は、それぞれ $3.6[\text{T}/\mu\text{s}]$ と $1.85[\text{T}/\mu\text{s}]$ となり、比透磁率は 1200 と 10000 となる。またコアでのエネルギー損失は、 $5[\text{kJ}/\text{m}^3]$ と $0.5[\text{kJ}/\text{m}^3]$ となり、けい素鋼板の体積 $0.5[\text{m}^3]$ に対してファインメットでは $1.0[\text{m}^3]$ が必要であることから、コア全体の損失は、 $2.5[\text{kJ}]$ と $0.5[\text{kJ}]$ となる。パルス幅 $1[\mu\text{s}]$ では、けい素鋼板の比透磁率が 1200 と小さくなことから、パルス幅 $1[\mu\text{s}]$ 以上の誘導電圧には、けい素鋼板が有効であり、パルス幅 $1[\mu\text{s}]$ 以下の誘導電圧には、ファインメットが適しているといえる。ファインメットコアを採用している線形誘導加速器（JLA）では、エネルギー損失の観点から $250\text{kV}-100\text{ns}$ で 1kHz の運転が可能であることがわかった。

3.2 誘導電圧波形制御

基本的には任意形状の加速波形を形成できることが誘導加速器の大きな特徴である。一方、ドライブ電源側から見た誘導加速空洞は電気回路的にはインダクタンス負荷であり、従来の誘導加速器では矩形の加速波形を発生させようとすると droop (立下り) が生ずる。また、図 3.2 に示した磁化曲線からも明らかなように、磁束変化量 ΔB を大きくとり飽和領域に達すると磁性体の非線形性は大きくなる。したがって、長パルスで高精度の誘導電圧波形制御を実現しようとすることはイオン誘導加速の大きな課題である。

加速電圧波形を高精度に制御するために、正弦波形をベースにした誘導電圧波形合成法を提案した [14]。波形合成型誘導加速ユニットの概念を図 3.3 に示す。図に示すように、1 周期分の正弦波形のピーク値と位相を調整して加速空洞内部で重畳・合成する。正弦波形に基づく波形合成法は、LC (インダクタンスとキャパシタンス) を基本とする単純なモジュール回路で形成できるうえ、加速ユニットあたりのモジュール数を最小にできること、磁性体の損失を小さくできることなどの利点がある。また、ユニットあたりの消費電力を小さくできるので、固体 (半導体) のスイッチング素子が利用できる。FET をスイッチング素子として用いて、高繰り返し動作や誘導加速電圧波形合成の原理実証実験も行なわれている [15,16]。

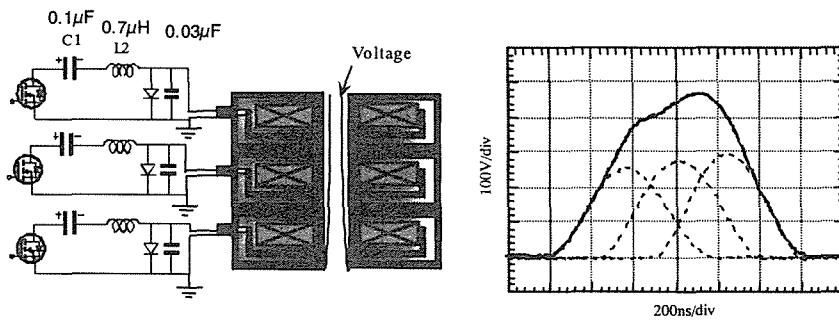


図 3.3 三角関数波形をベースにしたモジュール波形合成型誘導加速空洞の概念図

3.3 高繰返パルスモジュレーター

今まで開発してきた線形誘導加速器のパルス電源では、ギャップスイッチ、IGBT スイッチが採用されてきた。ギャップスイッチでは、シングルショットの運転に適しており、低コストである利点があるが、最大繰返し運転としては 10Hz 程度であり、しかもスイッチ自身に数 100ns 程度のジッターを持つ。このためパルス電源を連結して運転する場合には、不向きである。一方、IGBT スイッチでは、原理的には 1kHz 程度の動作が可能であり、ジッターの数 10ns 程度である。現在のところ 100Hz 程度の運

転が線形誘導加速を使って行われた実績があるが、繰返し数は磁性体の熱負荷および運転に伴う X 線シールドにより制限されている。

高エネルギー加速器研究機構の誘導型シンクロトロンで検討されている高圧パルスモジュレーターの回路図を図 3.4 に示す[17]。スイッチングアームには MOSFET が直列に並ぶ。4 個のアームの夫々 2 個をペアにして要求されるタイミングで、同時に切り替える事で DC 充電器で常にチャージアップしている大容量コンデンサーの電圧を負荷に印加する（左側上下）。一方、閉じたループに電流を流すシーケンス（右側上下）では負荷端に電圧は発生しない。このスイッチング動作を約 1MHz で加速中繰り返すため、MOSFET 自身での発熱も無視出来ない。水冷のヒートシンクに絶縁した MOSFET を貼付ける方法で熱の除去を行っている。図 3.5 は 100Ω 抵抗負荷の場合の負荷端電圧と 1MHz 運転の様子を示す[18]。

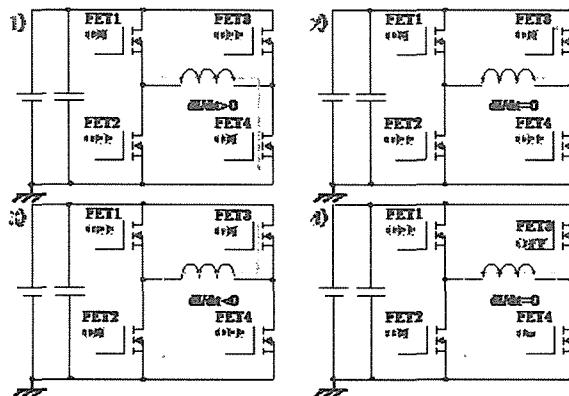


図 3.4 高圧パルスモジュレーターの回路図

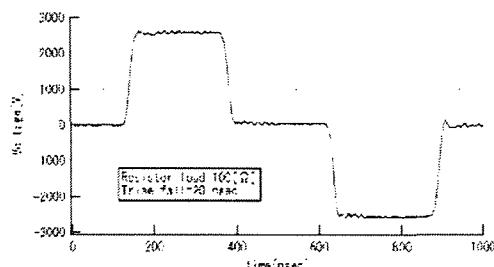


図 3.5 100Ω 抵抗負荷の場合の負荷端電圧と 1MHz 運転

誘導型シンクロトロンでは、1 台のギャップ電圧が 2.5kV と従来 250 kV に比べて 100 分の 1 である。このため 1MHz の高繰返しの高圧パルスモジュレータ動作が可能であるが、さらに 1MHz での高圧出力が可能なパルスモジュレーター開発が進み並列回路を組めば、線形誘導加速器を用いた応用分野が広範囲に波及すると思われる。

4. 電子・イオンビーム用インジェクター

線形誘導加速器では、電子や荷電粒子を加速するだけでなく、アノード・カソードを線形誘導加速器に内部や外部に配置することにより、電子やイオンビームを引出すためのインジェクターとしても機能する。大電流電子ビーム生成は、電界放出型電子銃を採用して kA 級電子ビームを引出し、イオンビーム生成では、外部からレーザーをアノード金属に照射し、アノード金属のアブレーションプラズマからイオンビーム引出す実験が行われた。引出した電子やイオンビームを効率よく加速・制御するためには、引出すビームのエミッタスを可能な限り低く抑えることが重要である。本章では、線形誘導加速器を大電流電子ビームのインジェクターとして利用いた場合の電子銃設計と実験結果[19]を中心に記述し、東京工業大学におけるイオンビームの引出実験結果[10,20,21]についても簡単に紹介する。

4.1 電界放出型電子銃

大電流線形誘導加速器（JLA）では、 $10\sim kA/cm^2$ 程度の電流密度が容易に得られ、しかも真空度が $10^{-3}Pa$ 程度においても動作する電界放出型電子銃を採用した。この電界放出型電子銃は、金属内のフェルミ準位で束縛されている伝導電子を外部から強電界を印加してトンネル効果によって外部に電子を引き出す手法である。この電界放出の解析は古く、1982 年に Flower や Nordheim 達によってなされ、引出される電子の電流密度と電界の関係が、

$$j_{FN} = 3.2 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} \exp[-6.8 \times 10^{-7} \frac{\varphi^{1.5}}{E}] [A/m^2] \quad (4.1)$$

となることを明らかにした。ここで φ は金属の仕事関数である。電子を引出すための電界は、通常 $1.8 \times 10^5 V/m$ 程度である。逆の考え方をすれば、電子ビームを引出すカソード表面以外の電界強度を $1.8 \times 10^5 V/m$ 程度以下に設計しなければ、カソード表面以外の金属から電子ビームが引出され、カソード表面の電界分布を乱すことになる。

4.2 電子銃部の配置

インジェクターユニット内に電子銃部を設置する方法の 1 つとして、図 4.1 に示すインジェクター中央部にカソードロッド及びアノードロッドを介して、カソード及びアノードを取付ける配置がある。カソードにはベルベット材や炭素系纖維材の布を用いる。ベルベット材は布表面に小さな纖維が均一に突起した分ものであり、炭素系纖維材の布は直径ミクロンマ程度の纖維の集合体である。アノード

ドには、電子ビームを透過するためのホールやメッシュをカソード表面の電界分布を乱さない程度に設けてある。

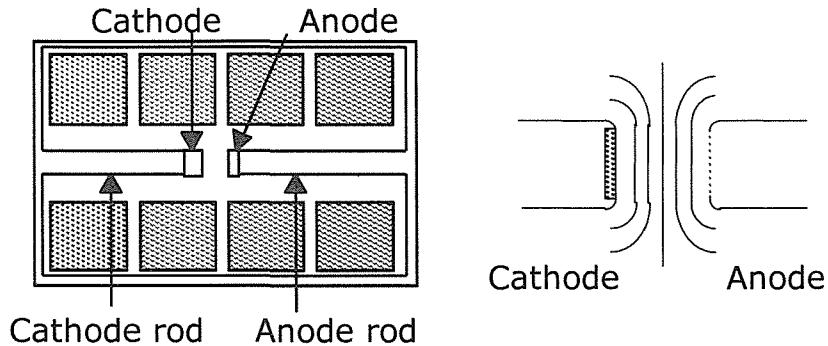


図 4.1 電子銃部の配置（1）

引出される電子ビームの電流密度は、Child-Langmuir の式

$$j_{ch} = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \cdot \frac{V_0^{3/2}}{d^2} \quad (4.2)$$

に比例した電流密度が得られる。ここで V はカソード・アノード間の印加電圧、 d はアノードカソード間の距離である。つまり印加電圧を一定とした場合、カソード・アノード間の距離が短いほど高い電流密度が得られる。図 4.1 に示すよう配置では、カソードから高い電流密度が得られるがアノードを透過した電子ビームがアノードロッドに当りビームロスを生じる。これを改善したのが図 4.2 に示す電子銃部の配置である。

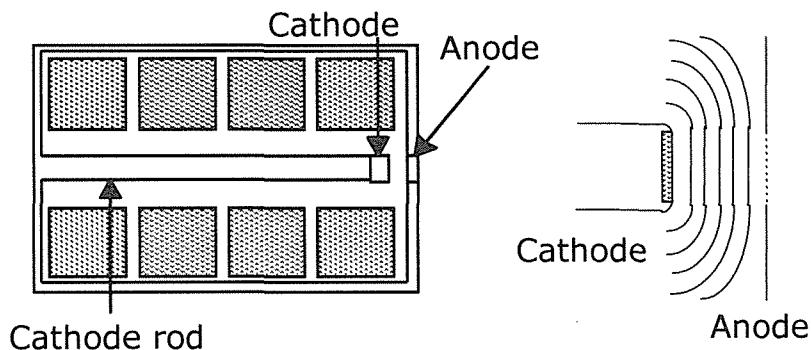


図 4.2 電子銃部の配置（2）

この場合、カソードコーナーの部分に強電界が加わるために径方向の電界成分 E_r をカソード・アノード間の距離を最適化して抑制するか、コーナーに曲率を設ける必要がある。なお、円柱ビームを引出す場合、径方向の電界 E_r は、

$$E_r = \frac{V}{r_b \ln\left(\frac{r_d}{r_b}\right)} \quad (4.3)$$

から得られる。ここで r_b はビーム半径、 r_d はインジェクタユニットの内径である。つまりビーム径、カソードロッドやアノードロッドの径における径方向の電界 E_r を最小にするためには、インジェクターの内径で決まることを示す。一方、コーナーにおける電界分布を利用して、中空ビーム（ホロービーム）を引出すことができる。図 4.3 に示すようにカソードエッジ側にカソード材を貼付け、カソード中心部に電子が電界放出しない程度にへこみをつける。写真は、石英ガラスにビームを衝突させ、チエレンコフ光を撮影したものである。中空ビームの外周側は E_r 電界により軌道を乱されメッシュの外側に衝突してロスするが、中空ビームの内面側は中央部分のへこみによる電界分布の集束効果により中心軸方向へ引出される。

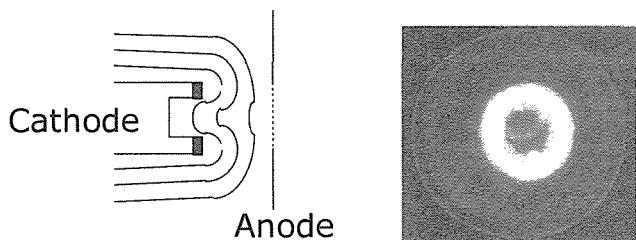


図 4.3 中空ビーム放出型カソード

電子銃部の配置（2）に対して径方向の E_r 電界を緩和したのが、図 4.4 に示すダイオードチャンバーを設けた電子銃部の配置である。

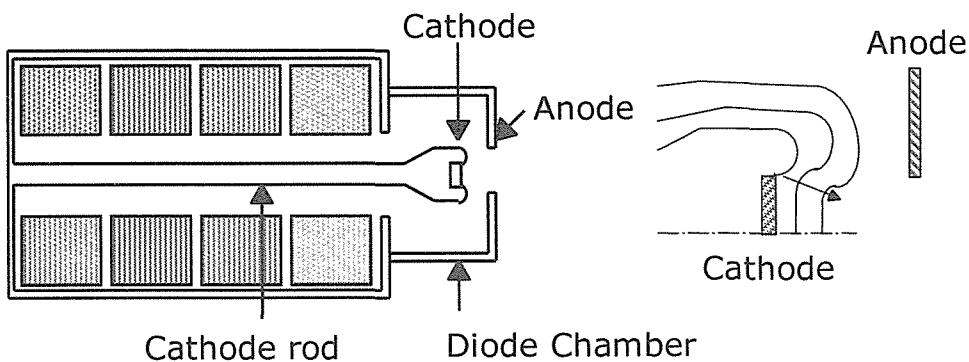


図 4.4 電子銃部の配置（3）

この配置の特徴は、 E_r 電界強度を緩和するために、インジェクタユニットの内径より大きなダイオードチャンバーを設けて、カソードをダイオードチャンバーの中に配置している。ダイオードチャンバーの内径を大きくすることにより、カソード・ヘッド部分の電界分布を自由に設計することができる。カソード外周に設けた曲率をもった突起した部分は、電界分布による円柱ビーム外周部分の集束効果を得るための構造である。

4.3 低エミッタンス化電子銃

1MeV-1kA 級電子ビームにおいて低エミッタンス化を目指した電子銃の設計 [19]のために、ビーム軌道計算コード EGUN コード[22]を用いた。この EGUN コードは、電子銃部を構成する電極形状を与え、電極間の空間をメッシュで細かく分割して電極間に印加する電圧に対する等ポテンシャル分布を解析している。等ポテンシャルの解析では、ポアソン方程式を有限要素法により各メッシュの交点の電場を計算している。この各交点の電場を用いて相対論的運動方程式を解き電子ビーム軌道を求める。このビーム軌道により各メッシュの交点の電荷密度が得られ、空間電荷効果を含む各メッシュの交点における電場が解析される。ビーム軌道前の電場とビーム軌道後の合成電場が各メッシュの交点に与えられ、再度ビーム軌道が解析される。新たなビーム軌道解析で得られた電場と前回の合成電場を比較し、電場の差が十分小さくなるまで電場の補正を繰返し、ビーム軌道の解析を行っている。

図 4.5 に解析した電極の形状を示す。1kA 級の電子ビームを引出すため、カソード径を $\phi 70\text{mm}$ とし、アノードは、メッシュレスの構造とした。ウェーネルト電極はカソード電位と同じで電界分布を形成する役割をし、材質は金属である。このウェーネルト電極の径方向の電界強度を 180kV/cm 以下に押された条件の基に、 1kA の電流値が得られるためウェーネルト電極形状およびウェーネルト電極の先端とアノード間のギャップ長を解析した。ウェーネルト先端部の半径は大きいほど正規化工ミッタンスは低くなった。これは先端部の曲率によりカソード外周部に集束効果を持つ電界分布のためであり、半径が 26mm の時、径方向の電界 E_r を 180kV/cm 以下になることが判明した。この場合、ウェーネルトの直径が $\phi 188\text{mm}$ となり、式 (4.3) からダイオード・チャーンバーの内径は $\phi 508\text{mm}$ となる。

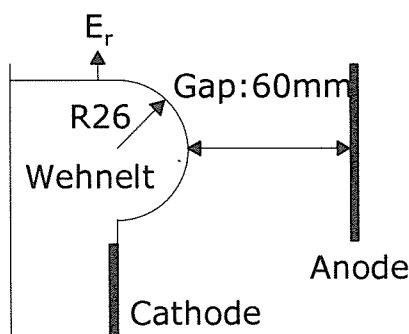


図 4.5 電極の形状

図 4.6 に EGUN によるビーム軌道を示す。ウェーネルト先端部とアノードとのギャップ長は 60mm であり、アノードを透過する電流は 989.1A 、正規化工ミッタ

ンスは、 $2.264 \times 10^3 \pi [\text{mm-mR}]$ となった。図4.7にギャップ長に対する E_r と E_z の最大電界成分を示す。 E_z 最大電界値が 200kV/cm を超えているが、カソード表面の電界を乱す E_r 最大電界値がすべて 180kV/cm 以下であることがわかる。ウェーネルト先端部の 180kV/cm を超えた E_z 電界により電子が電界放出するが、アノード電極に衝突して損失することは避けられない。アノードを透過する 1kA とウェーネルト先端部から電界放出する電流の和がダイオード電流となる。図4.8にギャップ長に対する電流値と正規化工ミッタンスを示す。ギャップ長を短くするほど電流値は、式(4.2)に従い増えるが正規化工ミッタンスは、劣化していることがわかる。

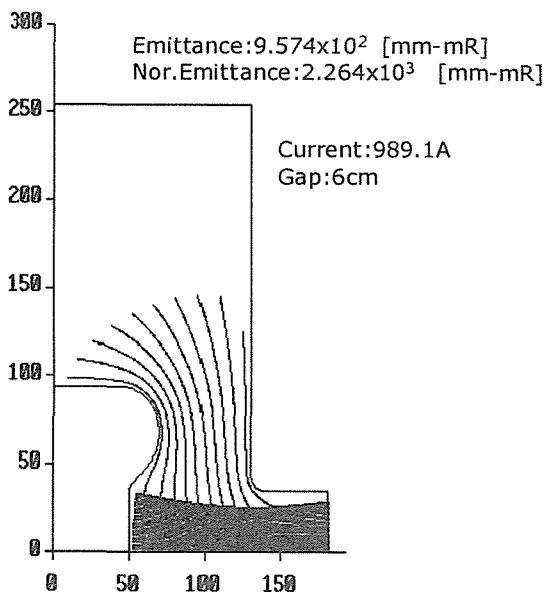


図4.6 EGUNによるビーム軌道

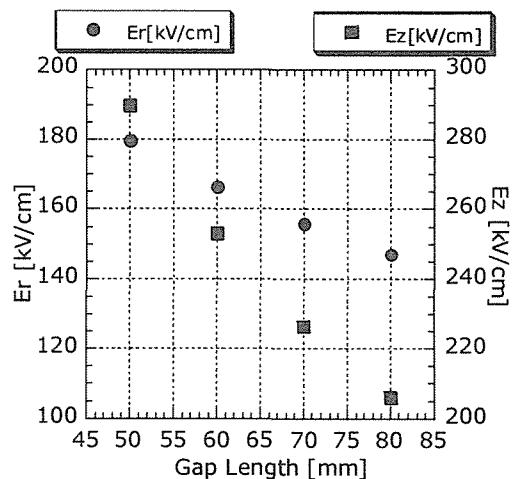
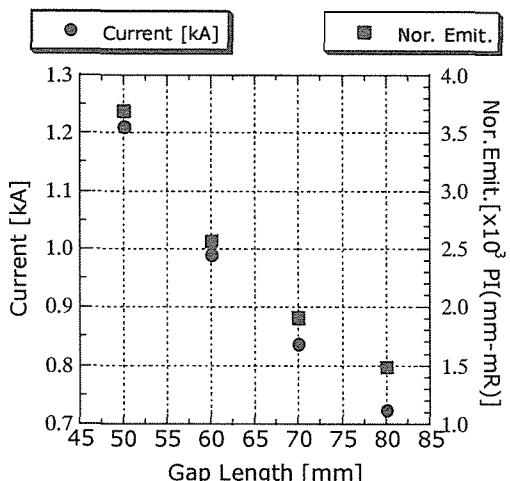
図4.7 ギャップ長に対する E_r と E_z の最大電界成分

図4.8 ギャップ長に対する電流値と正規化工ミッタンス

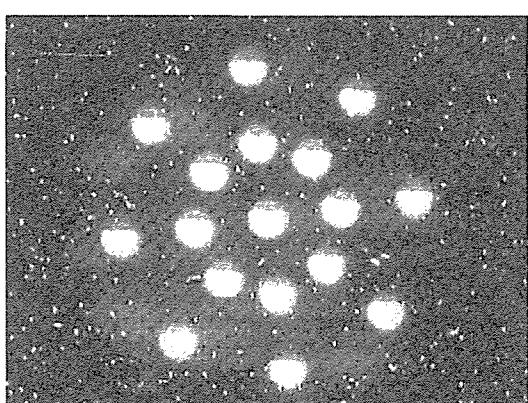


図4.9 チェレンコフ光による発散角測定

図 4.9 は、ギャップ 60mm の電子銃で 1MeV-1kA の電子ビームが、 $\phi 1\text{mm}$ のピンホールを透過し 250mm 後方に置いた石英ガラスに衝突し、チェレンコフ光を CCD カメラで撮影したもので、250mm 離れたビーム広がりは $\phi 10\text{mm}$ であった。発散角に換算すると $5.7\pi\text{mR}$ であり、x, y 方向のビーム直径が 80mm 程度だと仮定するとエミッタンスは、 $456\pi\text{mm-mR}$ 程度となり、解析結果の $957\pi\text{mm-mR}$ の約半分程度となった。解析結果がビーム径の最外周部のエミッタンス・正規化工ミッタンスを解析しており、図 4.6 が示すようにエミッタンスとしては最も高い値である。一方、測定のエミッタンスは、軸中心部のビームを計測しており、エミッタンスとして最も低い値であることから、この違いが解析結果と測定結果の差と考えられる。測定した電流値は、ほぼ 1kA 程度となり解析結果と一致した。

4.4 イオンビームの引出実験

大電流電子ビームを発生する目的で製作されインダクションモジュールを、大電流のイオンを加速するビーム物理および加速器技術の研究のために改造した。改良前のインダクションモジュールの仕様を表 4.1 に示す。イオンは電子に比べて、同じ加速電圧の下では得られる速度が遅いため、駆動するパルス電圧のパルス幅を 4 倍の 400 ns に延ばし、その分だけ発生電圧は 4 分の 1 に下げることとした。この新しいパルス波形を得るために、パルスフォーミングライン (PFL) が新たに設計・製作した。この PFL の仕様を表 4.2 に示す。PFL 部分の写真を図 4.10 に示す。イオン加速用のインダクションモジュールとパルスラインの模式図を図 4.11 に示し、改造後のインダクションモジュールの仕様を表 4.3 に示す。4 台のモジュールを直列に繋ぎ、個々のモジュールに PFL の出力を並列に供給し、発生電圧を 1 力所に集める adder 配置となっている。図 4.12 に 4 台のインダクションモジュールを連結した誘導電圧発生装置とレーザーイオン源の外観写真を示す。

表 4.1 電子加速用インダクションモジュールの仕様

磁性材料	磁性コア部胴体直径	磁性コア部胴体長	モジュール長
フェライト	580 mm	335 mm	505 mm
発生電圧	パルス幅	インピーダンス	スイッチ形式
200 kV/module	100 ns	50 Ω/module	ギャップスイッチ

表 4.2 パルスフォーミングラインの仕様

インピーダンス	絶縁媒質	パルス幅	線路長	充電電圧	出力電圧
12.5 Ω	純水	400 ns	6.8 m	100 kV	50 kV

表 4.3 イオン加速用に改造後の仕様

発生電圧	パルス幅	出力の結合	出力スイッチ	全長
200 kV max	400 ns	4台の adder	ギャップスイッチ	2 m

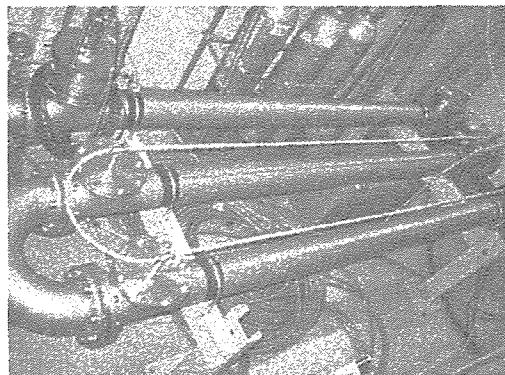


図 4.10 パルスフォーミングラインの外観

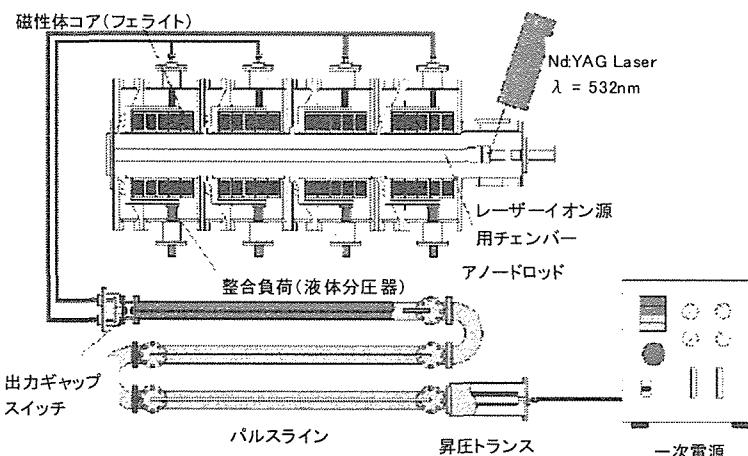


図 4.11 インダクションモジュールとパルスラインの模式図

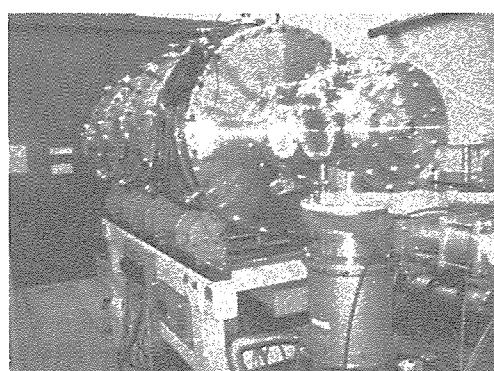


図 4.12 インダクションモジュールとレーザーイオン源

インダクション高電圧発生装置にレーザーイオン源を組み込み、大電流の重イオンを発生する試験を行った。実験装置の模式図を図 4.13 に示す。インダクションモジュールを 4 台繋げ、中心部の導体の先端であるアノードに全電圧が集中する induction adder 構造である。アノードロッドの中心部に銅板を置き、銅板

に真空容器の外部からレーザーを照射し、銅のアブレーションプラズマを生成する。使用するレーザーは小電力の YAG レーザーまたは KrF エキシマレーザーであり、照射密度は $\sim 10^8 \text{ W cm}^{-2}$ である。この照射密度はアブレーションプラズマが生成される閾値に近く、レーザー生成プラズマであるにも関わらず温度は 1~3 eV と低い。このため、レーザー照射から数 μs を経過すると生成される銅イオンの電荷は 1+ と 2+ が主成分となる。図 4.13 の右側にはインダクションモジュールが発生する電圧波形および引き出された銅イオンの電流波形を示す。電圧波形の時間幅は設計通りの 400 ns である。引き出される銅イオンの光学的な性質をレーザー照射時刻と引出電圧発生時刻の関係で調べた例を図 4.14 に示す。ここで、上部は加速電圧、中央部はプラズマ電流、下部は引出電流である。プラズマ電流のピーク時刻に合わせて引出電圧を印加すると光学的性質の良いビームを引き出すことができた。

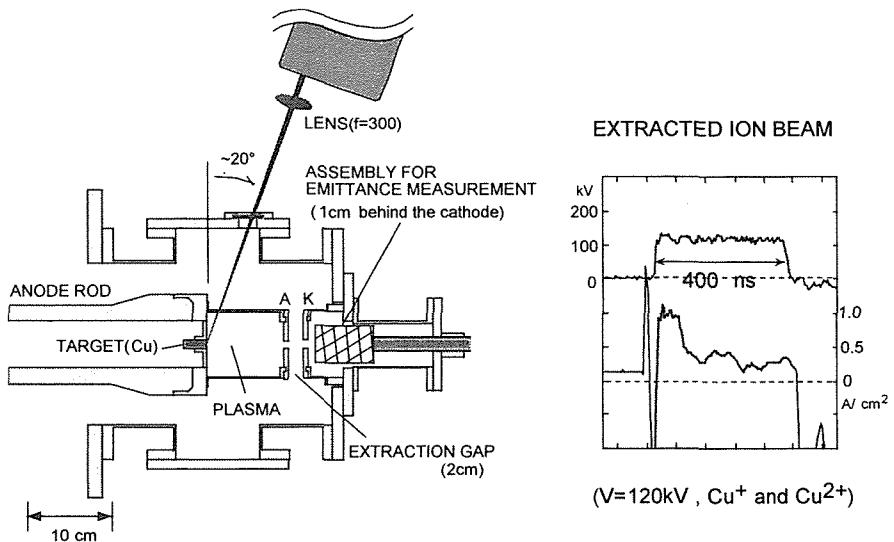


図 4.13 インダクションモジュールに組み込まれたレーザーイオン源。右図は電圧波形と引出電流を示す。

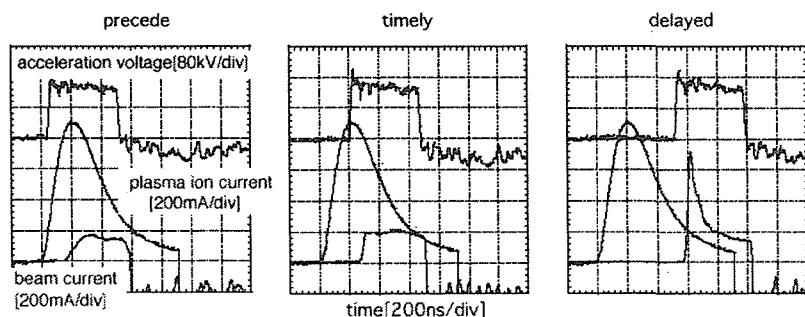


図 4.14 プラズマイオンフランクスに対する引出高電圧のタイミングが及ぼすビーム光学

5. 線形誘導加速器による応用分野

線形誘導加速器による応用分野としては、大電流の電子ビームやイオンビームを加速してエネルギーードライバーとして応用する慣性核融合への応用のみならず、大電流電子ビームをミリ波マイクロ波に変換して、その大出力ミリ波マイクロ波を応用する核融合プラズマ加熱、高勾配加速技術や地球環境問題のオゾン層修復、また線形誘導加速器の高繰返化に伴い、新たな加速技術である誘導型シンクロトロンなど応用が検討されてきた。本章では、大出力ミリ波マイクロ波発振を中心記述し、ミリ波 FEL を使った最初のプラズマ実験である MIT 実験、大出力マイクロ波を応用した高勾配加速技術、また最近実証研究が開始された誘導型シンクロトロンについて紹介する。

5.1 大出力ミリ波マイクロ波発振

図 5.1 にプレーン・ウイグラーの構成と磁場強度の関係式を式(5.1)に示す。ビームの伝送方向は z 方向であり、ウイグラー磁場成分 B_y により x 方向に蛇行しながら z 方向へ伝送する。ウイグラー磁場中では、x 方向へのビーム損失が発振性能を左右する。このためウイグラー外周にソレノイドコイルや 4 重極マグネットをウイグラー全長にわたり配置して、軸方向に縦磁場や x、y 方向に収束磁場を印加してビームをガイドしたりする。伝送する電子ビームが 1A 以下の低い電流値であれば小さな導波管を採用し、コンパクトなソレノイドコイルや 4 重極マグネットの配置で問題ないと考えられるが、1kA 級の電子ビームを取扱う場合、ソレノイドコイルや 4 重極マグネットは大型化して、複雑なウイグラー系となってしまう。

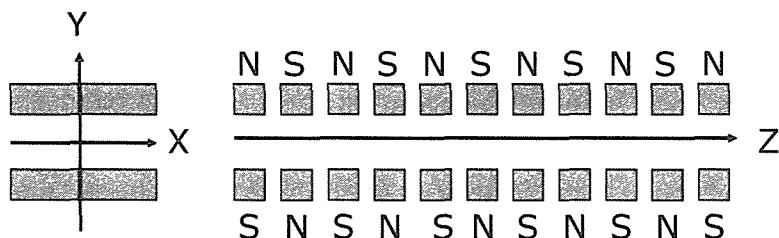


図 5.1 プレーン・ウイグラーの構成

$$\begin{aligned} B_x &= 0 \\ B_y &= B_\omega \cos \kappa_\omega z \\ B_z &= 0 \end{aligned} \tag{5.1}$$

これを解決する手法としてフォーカスィングウイグラーが考案された。これは x 方向へ蛇行した電子ビームがウイグラーの端部でウイグラー中心磁場より高い磁場により曲げられ、ビーム損失を抑制させる方法である。図 5.2 にフォーカスィングウイグラーの断面形状と x 軸上の B_y 成分の分布を示す。

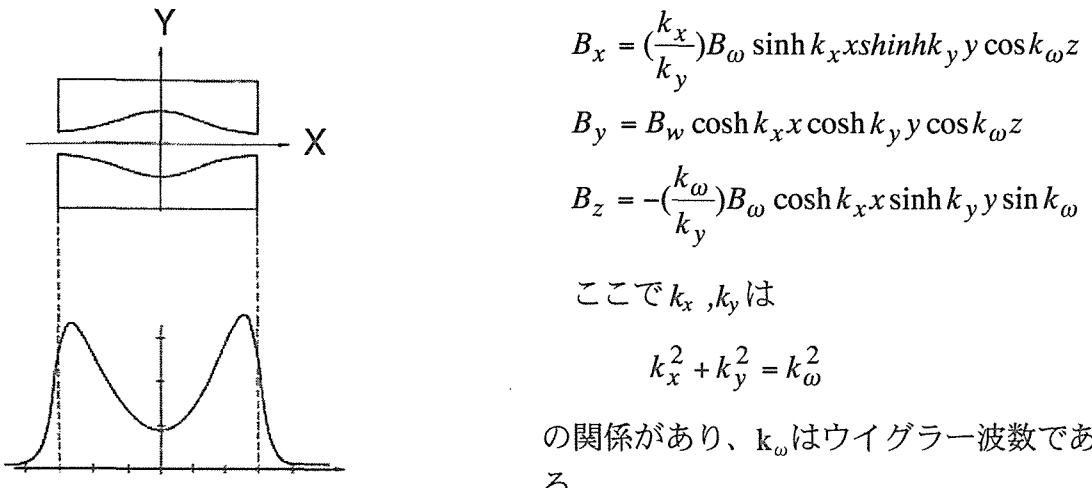


図 5.2 フォーカスティングウイグラーの
断面形状と x 軸上の By 成分の
分布

1号機である線形加速器 LAX-1 (1 MeV, 3kA, 100ns) における 45GHz 帯 FEL 実験では、導波管として $\phi 22.4\text{mm}$ を採用し、 $k_x=k_y=k_\omega/2, B_{\omega 0}=1.8\text{kG}$ の条件の基にウイグラー波長 $\lambda_w=45\text{mm}$ の永久マグネットによるフォーカスティングウイグラー (全長 $L=35\lambda_w$) 長を製作した。前段の $5\lambda_w$ は、アディアバティック磁場であり、 $B_{\omega 0}=0.0\text{kG}$ から $B_{\omega 0}=1.8\text{kG}$ までウイグラー磁場を線形的に立ち上げ、 $5\lambda_w$ から $35\lambda_w$ 間はウイグラー磁場 $B_{\omega 0}=1.8\text{kG}$ である。ソレノイドコイルによる縦磁場 $B_0=0.5\text{kG}$ を印加することにより、ウイグラー磁場入口で 390A、出口 320A の伝送効率 80% を超える電子ビームを伝送することができた。電子ビームエネルギーは、820keV である。図 5.3 に 200W を入射した時の FEL 増幅電力を示す。 $z=25\lambda_w$ で増幅電力が飽和し、飽和出力 6MW が得られた。この時の空間成長率 60dB/m となり、当時では世界最高記録を達成した[1,2]。

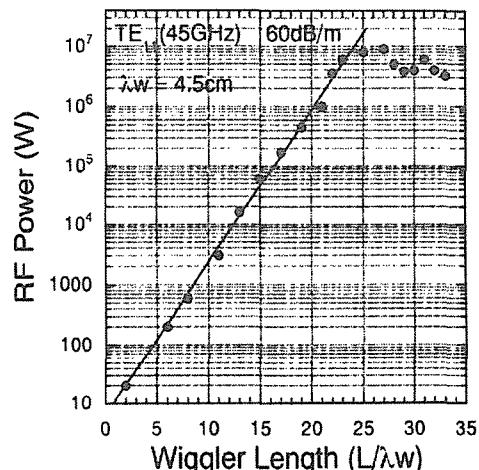


図 5.3 ウイグラーピッチ数に対する
FEL 増幅電力

この永久マグネットによるウイグラーは、導波管サイズが $\phi 22.4\text{mm}$ と小さいためにウイグラー中心磁場 $B_{\omega 0}=1.8\text{kG}$ が可能であり、電流を増加するために導波管サイズを大きく、または磁場強度を高くするためには電磁誘導によるウイグラー設計が必要となる。

大電流線形誘導加速器(JLA)による2MeV-1kAの電子ビームにより100MWクラスの発振を目指したXバンドFELの設計について述べる。 $\phi 30\text{mm}$ -1kAクラスの電子ビームを伝送するために、オーバーサイズの矩形導波管(WR510)： $129.54 \times 64.77\text{mm}$ を採用し、ウイグラーコイルの設計を行った。図5.4にフォーカスィングウイグラーの断面図を示す。図中のaおよびbは、矩形導波管の長辺と短辺の寸法である。ウイグラーの設計では、ウイグラーの波長 $\lambda_w=16\text{cm}$ とし、 $20\lambda_w$ 以内で飽和出力が得られる k_x 及び k_y のウイグラー波数を求めた。この結果、 $k_x=15.9[\text{m}^{-1}]$ 、 $k_y=35.9[\text{m}^{-1}]$ を採用した。この時のx軸上におけるx軸方向のウイグラー磁場分布を図5.5に示す。x軸中心では $By=1.8\text{kG}$ で導波管の端部($x=64.77\text{mm}$)では $By=2.8\text{kG}$ を超えた磁場となる。

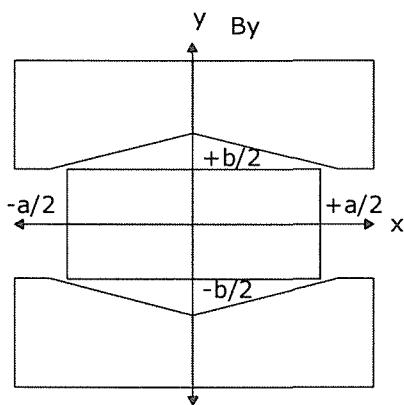


図5.4 フォーカスィングウイグラー
の断面図

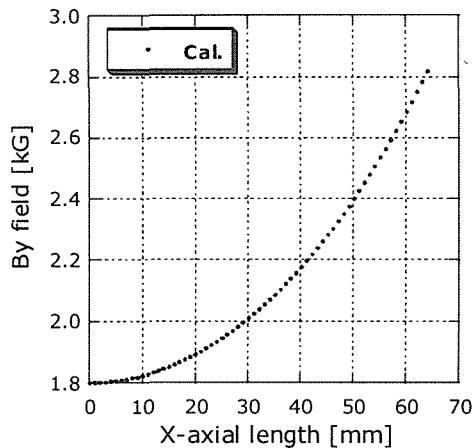


図5.5 x軸方向のウイグラー磁場分布

図5.6は、既存するマグネットロンから9.4GHzで100kWを入射した時のFEL增幅シミュレーションの例である。実線はウイグラー磁場がピッチ数に対して一定な場合であり、 $16\lambda_w$ で300MWの飽和出力が得られた。また点線は、飽和出力が得られた $16\lambda_w$ から $20\lambda_w$ にかけてウイグラー中心磁場を 1.8kG から 0.6kG へ線形的に減衰させたダウンテーパーウイグラー磁場におけるシミュレーションであり、飽和出力が300MWから700MWに改善される解析結果が得られた。これは $16\lambda_w$ 間でビームエネルギーが高周波電力に変換され、ビームエネルギーが低減して共振条件からずれ、ダウンテーパー磁場により共振条件を補正することにより増幅が $20\lambda_w$ まで続いていると考えられる。ダウンテーパーウイグラー磁場によりRF変換効率が18%から35%に改善され、ダウンテーパーウイグラー磁場の採用は、高効率化の一手法である。

オーバーサイズの矩形導波管(WR-510)は、従来2GHzの高周波伝送に用いられる導波管であり、9.8GHzの高周波に対して励磁可能な高次モードは、 TE_{01} から TE_{72} モードまで総数24モードとなる。この高次モードの中で増幅するモードを図5.7に示す。シミュレーションは、各モードにおいて1Wの入力電力を想定した場合である。FEL設計モード(TE_{01})以外に TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{51} モードが増幅することがわかった。また

TE_{21} モードの空間成長率が TE_{01} モードより 100 倍以上高いことが判明した。また入力電力を 100kW とした場合、 TE_{21} モードの空間成長率は TE_{01} モードの約 20 倍であったことから、 TE_{01} モードの增幅出力の約 1/10 以下に抑えるには、 TE_{01} モードに対する TE_{21} モードの割合を 0.5% 以下に抑える必要があることが判明した。この条件が高周波入力系 (RF Input Coupler) の設計条件となる。

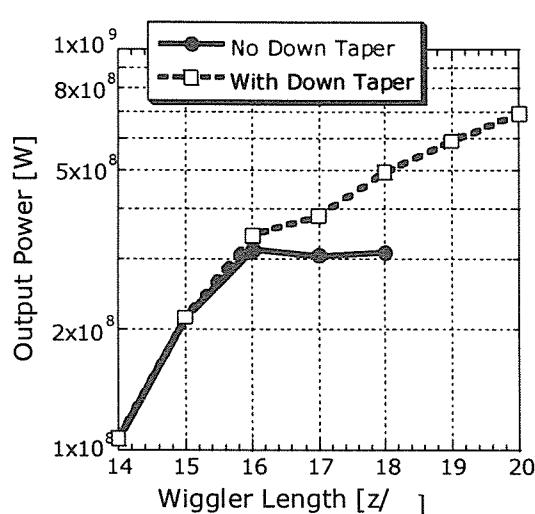


図 5.6 100kW を入力した時の設計モード (TE_{01}) の FEL 増幅シミュレーション

FEL 増幅のシミュレーションでは、入力電力を 1MW レベルから 200MW レベルまで入射した場合の FEL 増幅を解析した。シミュレーションの結果を図 5.8 に示す。入力電力を増加した場合、飽和出力を得るためにウイグラー・ピッチ数は短くなるとともに、飽和出力も高くなることが判明した。これは大電力入射によりバンチングが短いピッチ数で生成しているためである。入力電力 200MW を入射した時は、ウイグラー・ピッチ数 $5\lambda_w$ (全長 90cm) で飽和出力が 500MW となり、コンパクトな增幅系となる。逆にプリバンチしたビームをウイグラーに入射すると少ないウイグラー・ピッチ数で飽和出力が得られることを示す[23]。

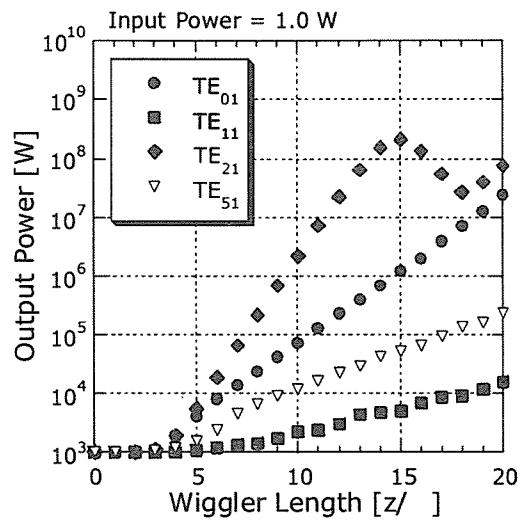


図 5.7 1W を入力した時の高次モードの FEL 增幅シミュレーション

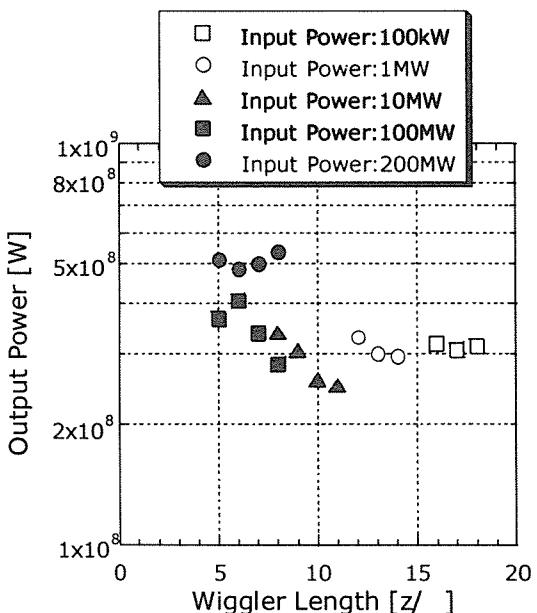


図 5.8 大電力入射に対する FEL 出力

200MW レベルの高周波源としては、加速器分野で開発が進められている短パルスク

ライストロンを用いることは不可能ではないが、LAX-1 線形誘導加速器（1 MeV-3kA）で 200MW 出力を実証した BWO による出力とバンチビームを用いてコンパクト FEL システムとして新たに BWO-FEL システムの概念を提案する[24]。

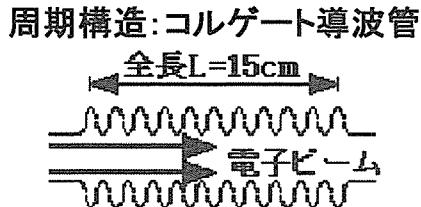


図 5.9 BWO の遅波回路

BWO は、図 5.9 に示すようにコルゲート導波管による遅波回路を用いる。コルゲートの長さは 15cm であり、ピッチ長 15mm が 10 ピッチ設けられている。管内の直径は 21.8mm であり、ピッチの深さは 2.8mm である。LAX-1 線形加速器を用いた実験配置と実験結果を図 5.10 に示す。ビームエネルギー 800keV で 210MW の BWO 発振出力が得られた[5,6]。BWO 発振に用いた電子ビーム電流は 2.7 kA である。

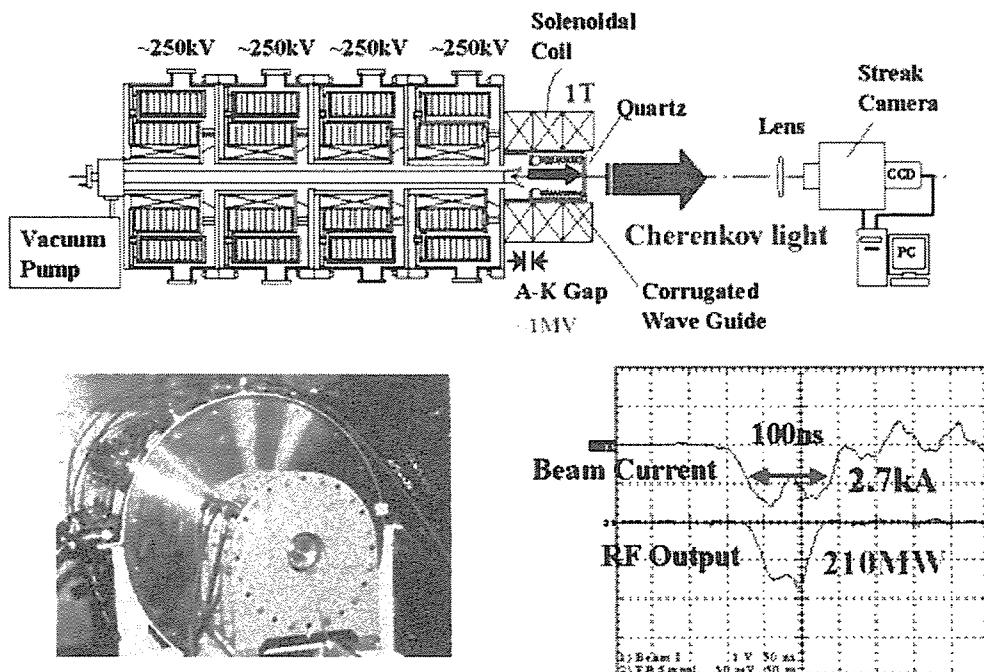


図 5.10 LAX-1 線形加速器における BWO 実験配置と実験結果

図 5.11 に示したのが環状ビーム（左）と円柱ビーム（右）を使った BWO 発振におけるビームバンチング様子を観測したデータである。ビームバンチングの様子は、コルゲート導波管の後ろに石英ガラスに設定し、ビームが石英ガラスに衝突してチェレンコフ光を最大分解能 10ps の高速カメラで計測した。ビームバンチングの周波数は、10GHz 程度であり BWO 発振周波数とほぼ一致した[6,7]。

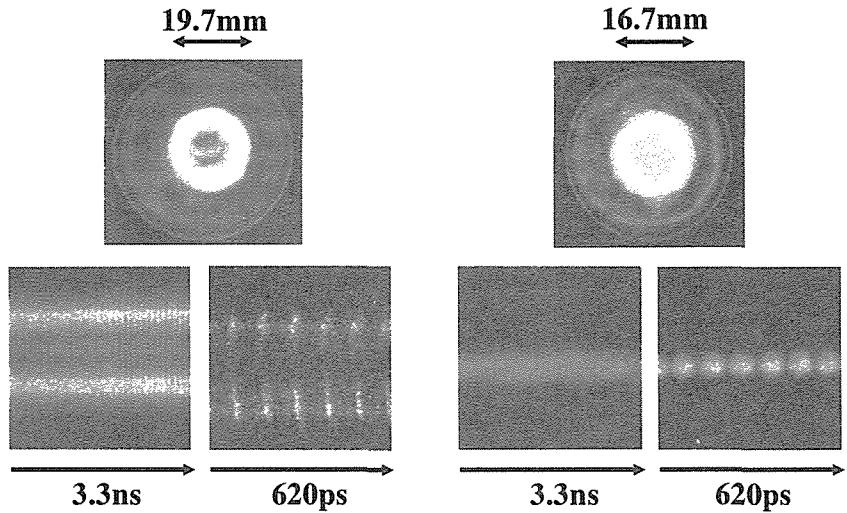


図 5.11 環状ビームと円柱ビームを用いた BWO 発振における
ビームバンチングの様子

図 5.12 にマイクロ波を高速オシロスコープにて計測し、フーリエ変換して得た発振周波数スペクトラムの解析結果である。解析した発振周波数スペクトラムの中心周波数は、10.2GHz であり、2 倍 3 倍の高調波はほとんど無視できるほど低いレベルであることがわかった。

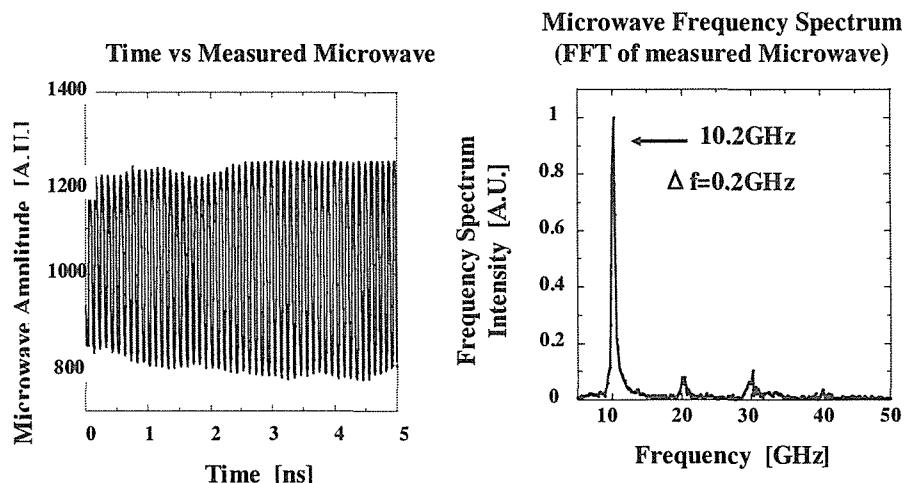


図 5.12 BWO 発振出力の高速オシロスコープによる計測結果（左）と
FFT 変換した発振周波数スペクトラムの解析結果

1MeV-3kA の BWO 発振では、全長 15cm のコルゲート導波管により 200MW クラスの発振を実証し、FEL のコンパクト化に必要な大電力入射の高周波源としてだけではなく、プリバンチャーシステムとしても機能することが期待される。このため FEL ウィグラーの前段にコルゲート導波管を設置し、BWO による大電力高周波源とプリバンチャーシステムを機能させ、FEL ウィグラーにより大出力化・コンパクト化を目指した BWO-FEL システムによる実証が重要である。

5.2 核融合への応用 MTX 実験 (Microwave Tokamak Experiment)

MTX 実験の内容に入る前に、核融合プラズマの加熱・電流駆動に対して FEL による ECH の特長として考えられることを挙げる。ちなみに、現在の炉心プラズマ研究では高性能化がキーポイントである。すなわちプラズマ内部、或いは、プラズマ境界層部に作る輸送障壁を定常的に維持するために、高ベータ(圧力)プラズマの電磁流体力学的不安定性を如何に抑制するかが焦点になっている。つまり局所的加熱・電流駆動・運動量駆動などの制御手段によりプラズマの圧力分布・電流分布(ブートストラップ電流という自己電流も含む)・流速分布・ポテンシャル分布を制御して如何にすれば乱流輸送を低減できる高ベータの自己組織化状態を維持できるのかを研究している。この研究手段として重要視されているのが ECH である。ECH の核融合研究手段としての特長としては、

1. 電子サイクロトロン共鳴なので加熱・局所電流駆動の空間的局所性が原理的に良い。
2. ミラーアンテナを使えるので吸収位置の可変性・制御性が良い。
3. プラズマへの吸収率が高い。高密度ではほぼ 100%。
4. プラズマへの近接性が良い(すなわち、電磁波は自由空間に放射されるのでアンテナを近付けなくてもプラズマに吸収される)。
5. 波長が短いので電磁波のもつエネルギー密度が大きい。

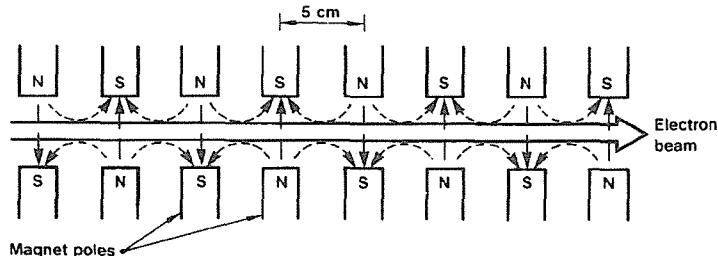
ことが挙げられる。また、FEL のジャイロトロン発振管と比較した場合の特長は、主に加速器からの電子ビームをウィグラー(図 5.13)に入射して電磁波を得るという発振原理に由来するのであるが、

1. 空洞共振器を用いていないので、高い周波数まで、大パワーの発振が可能である(赤外、可視光領域の発振まで可能。ジャイロトロンは原理的に高い周波数になるに従って空洞共振器の形状を小さくしなければならず空洞共振器の熱負荷・精度で出力パワー・出力モードの純度が制限される)。
 2. 周波数の可変性が大きい。すなわち、電子ビームエネルギーやウィグラー磁場を変化させて周波数を大きく変化させることができる。
- といふことが挙げられる。

自由電子レーザー(FEL)からの周波数 140GHz(波長約 2mm)の電磁波で世界で唯一、トカマクプラズマの電子加熱を行ったのが、この MTX 実験である[25]。トカマクプラズマの電子サイクロトロン加熱(ECH、Electron Cyclotron Heating)[26]は、旧ソビエト連邦で発明されたジャイロトロン発振管を用いているが、その単管出力は当時 0.2MW 程度であった。現在は、ジャイロトロン開発が進んだがそれでも単管出力は 1MW である。それに対して、MTX では短パルス(~20ns)ではあるが、FEL からの 0.8GW から 1.4GW

の大出力を入射してプラズマの非線形吸収を調べた。

(a) Side View



(b) Top View

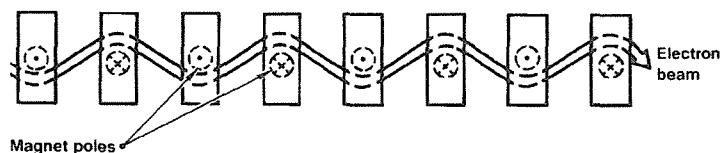


図 5.13. 自由電子レーザーに用いられたウィグラー。全長約 5m。線形加速器からの電子ビームは左から入射する。発生したレーザービーム(電磁波)は右方にいる。

実験は、米国 MIT 大学の Alcator-C トカマクを、ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)に運び込み、当時 LLNL で開発中であった ETA-II 加速器とウィグラーを用いた FEL と組み合わせて行われた(図 5.14)。この研究は、原研と LLNL の日米協力で行われ、原研は、加熱効果を調べるための高速な計測器(軟 X 線、電子サイクロトロン放射)、電界計測及び中性子計測などを担当した。LLNL の強力な理論グループが粒子軌道コード[27]を開発して電磁波の非線形吸収の計算を行った。計画ではまず FEL のシングルパルス入射を行い次にマルチパルス入射(バーストモード[28])に進むはずであったが、米国予算の縮小によりシングルパルスをトカマクへ入射する実験段階までで終了したため、FEL バーストモード発振の実証は行われたがトカマクへの入射実験までには至らなかった。

FEL 入射時のプラズマパラメタの時間発展の一例を図 5.15 に示す。中心磁場 5T で基本正常波の電子サイクロトロン共鳴層がプラズマ中心の場合であり、プラズマの中心部で急激な軟 X 線の増加と電子サイクロトロン放射の増加(図では省略)がみられ、共鳴電子によるエネルギー吸収が実証された。トムソン散乱でも中心温度 $T_{e0}=1.5\text{keV}$ 、中心密度 $n_{e0}=0.65\times 10^{20}\text{m}^{-3}$ に対して 1GW 入射で 7-8keV の高エネルギー電子成分を観測した。

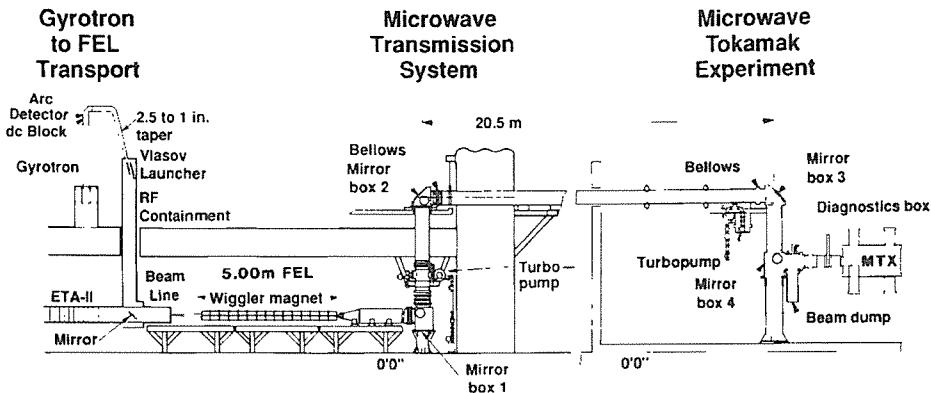


図 5.14. MTX 実験の装置。左から ETA-II 線形加速器、ウィグラー、Alcator-C トカマク(右端)。

電磁波の吸収率は(1-透過率)で定義されるが、プラズマ中心密度に対する電磁波の透過率のプラズマ密度に対する依存性を図 5.16 に示す。この透過率は、マシン内側でかつミラーアンテナの対向面に取り付けられた 48 チャンネルのカロリメーターにより測定された。電磁波のパワーが大きくなると非線形効果によりプラズマによる電磁波の吸収率が低下することが計算された。図では入射パワーが 3kW の線形吸収と比べて、0.75GW~1GW 入射の場合には、吸収率が小さくなる(透過率は大きくなる)ことが示されている。そして実験結果は非線形計算結果と合うことがわかった。また、ビーム入射をプラズマに対して垂直ではなく少し傾けることにより非線形吸収が増加することが計算より予測された。

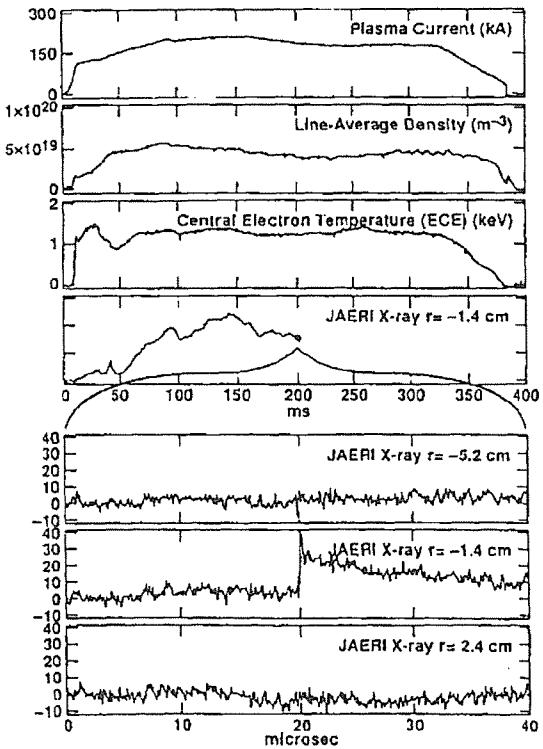


図 5.15. 自由電子レーザー入射時のプラズマパラメタ時間発展。プラズマ中心部の局所的電子加熱がみられる

実際にビームをテーパーによりはやく絞って屈折を大きくすることでこの効果を調べ、線形吸収率程度にまでプラズマによる吸収を増やせることを示した(図の FELinsert)

と書かれているデータ点と計算による点線(1GW)と実線(0.75GW)。

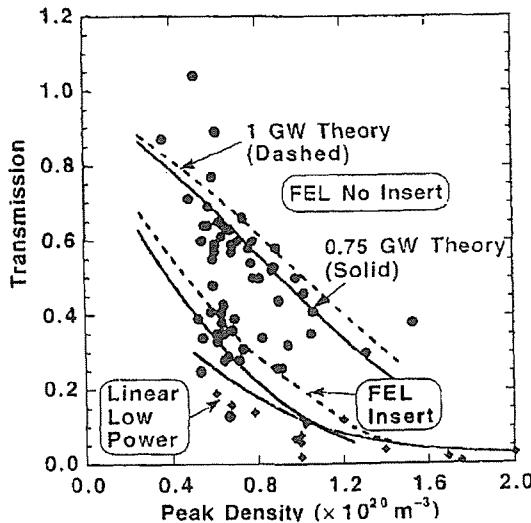


図 5.16. プラズマ中心密度に対する電磁波の透過率の依存性。共鳴層はプラズマ中心にある。非線形吸収(FEL no insert)は線形吸収(Linear low power)より小さいこと、及び、磁場との角度を大きくする(FELinsert)ことにより非線形吸収を線形吸収程度にまで改善できることを示す。

5.3 高勾配加速器

世界の多くの加速器研究所では、次世代の加速器と言われている TeV 級のエネルギーの電子・陽子リニアコライダー建設のために R&D が行われている。例えば、米国スタンフォード大学の NLC(Next Linear Collider)では、500GeV のコライダーを想定し、R&D が進められており、11.4GHz、パルス幅 1.2μs、繰返し 180Hz のクライストロンを用い、加速勾配 50MV/m を得る計画が進められている[29]。この場合、50MW クライストロンが 320 本必要となる。現在 X バンドのクライストロンでは、単管当たり 50~80MW の出力は得られているが、100MW 級以上の出力はなかなか難しいのが現状である。そこで 200MW 以上の出力を容易に得る方法として、図 5.17 に示すような線形誘導加速器を用いた大出力自由電子レーザーや相対論的クライストロンによる電磁波発生とコライダーとを組合せた 2 ビームコライダーの概念が提案された[30]。これはコライダーのメインの加速器部分と多段構成の線形誘導加速器から構成される。線形誘導加速器の加速モジュール間には、自由電子レーザーのウイグラーまたはクライストロンのキャビティが配置され、ウイグラー若しくはキャビティで発振した大出力パワーをコライダーに供給し、メインの加速器を駆動する。発振してエネルギーを失った電子ビームは、線形誘導加速器で再加速され、もとのエネルギーに戻る。この駆動用の大電流電子ビームのエネルギーは、約 10MeV 程度である。米国のチームでは、2MeV 線形誘導加速器を用いて 1 段の X バンド相対論的クライストロンで 200MW の発振

に成功しており[31]、また国内の高エネルギー加速器研究機構でも、X バンドで 1.6MeV 線形誘導加速器を用いて、1 段の自由電子レーザーで 150MW の発振に成功している [3,4]。

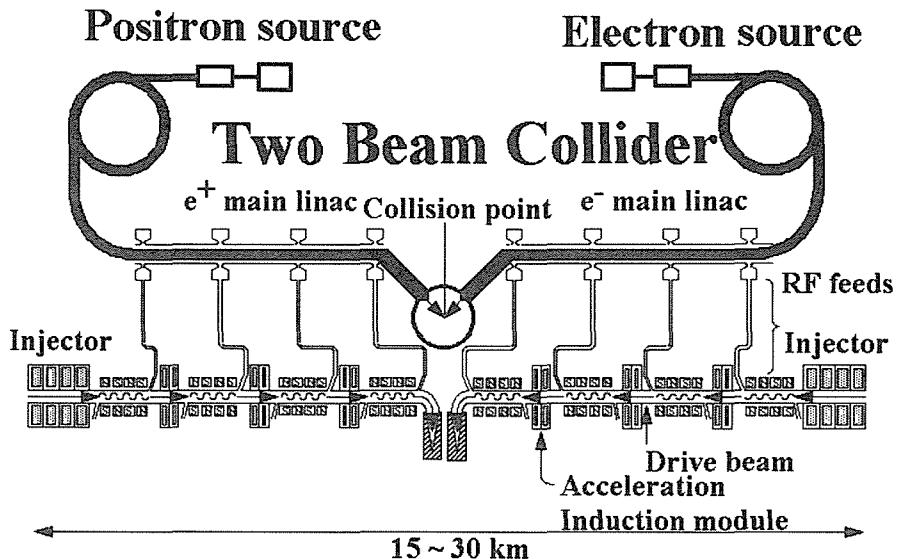


図 5.17. 2 ビームコライダーの構成図

5.4 誘導型シンクロトロン

次世代の大強度高エネルギー加速器として従来の RF シンクロトロンに代わる誘導加速シンクロトロンの概念[32]が提案された。誘導加速シンクロトロンの特徴は、

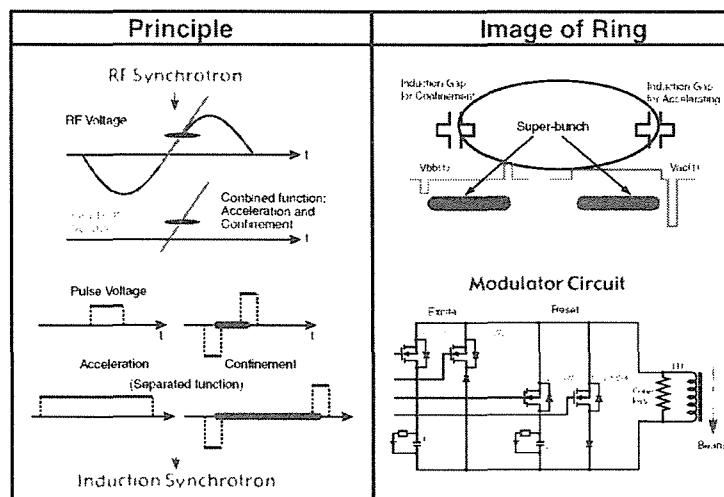
- (1) 誘導加速空洞にパルスとして発生させる正負の誘導電圧のペアーで縦方向（進行方向）にビームを捕捉し、マイクロ秒オーダーの長大な粒子群（スーパーバンチと呼ばれる）を作る。
- (2) 別種の誘導加速空洞に発生させる長パルスの誘導電圧でこの捕捉された状態のスーパーバンチを加速する。

誘導型シンクロトロン加速器の概念図を図 5.18 に示す。誘導加速シンクロトロン加速器では、バリヤーバケット加速方式と呼ばれる方式が検討され、イオンバンチの加速と伝搬軸方向の閉じ込めに、高繰り返し能力を持つ 2 つの独立な誘導加速ユニットが必要である[33]。粒子エネルギーの増加に同期して 1MHz 程度までの繰り返し動作と波形制御が必要になる。高速スイッチング、低ジッターでの高繰り返しと制御能力を持つパルスパワー駆動電源の開発が行なわれている [34]。高速の大電力スイッチング素子は高繰り返しパルスパワー電源の基本であり、FET や SI サイリスタの ON-OFF 動作、ON 抵抗の評価、直並列動作試験なども進行中である。RF シンクロトロンが進行方向についての閉じ込めと加速を共通の高周波で行う機能結合型であるのに比して、誘導加速シンクロト

ロンは閉じ込めと加速を分離した機能分離型と言える。

この誘導加速シンクロトロンの概念を適用して、現在稼働中の高エネルギー加速器研究機構の 12GeV 陽子シンクロトロン (12GeV-PS) に必要な誘導加速装置を導入し、この加速・閉じ込め方式の実証試験が平成 15 年度より開始された学術創成研究プロジェクト「誘導加速シンクロトロンの実証研究：スーパーバンチ加速と応用」として計画され、実行に移すべき準備が進んでいる[35]。この計画では、4 連の誘導加速空洞（出力：2.5kV/空洞）が用いられ、出力電圧は重畠されて粒子は周回当たり 10kV の加速電圧を受ける。誘導電圧のみで 8GeV のフラットトップまで加速される予定である。

Principle of Induction Synchrotron



K.Takayama and J.Kishiro, "Induction Synchrotron", *Nucl. Inst. Meth.* A451, 304 (2000)

図 5.18 誘導型シンクロトロン加速器の概念図

5.5 ニュートリノファクトリ計画

わが国はじめ米国、欧州においてはかなりの数の陽子加速器が建設運転されており、これまで主に素粒子原子核反応の研究を通して、物質の基本構造に関わる研究が精力的に行われて來た。歴史的には陽子加速器の加速エネルギーは年々増強され、それに連れて探査する物質の構造は微細を極めて來た。その中では理論的に予想されていた新粒子の発見を含め、現有の加速器エネルギーを遙かに凌ぐ非常に高エネルギー領域の物理への展望が可能になって來た。一方近年宇宙物理分野においては、観測技術の飛躍的な発達に助けられてその観測可能範囲が大きく広がり、宇宙発生の初期にまで急速に考察が進んでいる。加速器の加速エネルギーの増強と宇宙の初期状態の研究とは、ともに高エネルギー領域での素粒子反応の研究に通じ、ビックバーン初期の混沌とした素粒子に満ちた空間の物理そのものである。この様にこれまで独立に研究分野をすみ分けてきた二つの物理分野が、昨今急激に相補性を持ってきている。

高エネルギー加速器研究機構では、その所有する 12GeV 陽子加速器を使用したニュートリノ実験が平成 11 年度に開始された。これは約 5 年にわたって 10^{20} 個の陽子を加速して多数のニュートリノを作り出し、これまで質量が無いと考えられていたニュートリノに理論が予想する様な微少質量が有るのか否かの検証を目的にした実験である。ニュートリノ質量の有無は、これまで 4 種に分類されている素粒子界の力学をひとつに統一する大統一理論の検証に大きく寄与するばかりでなく、ビックバーン以来膨張を続ける宇宙が、遠い将来収縮を始めるのか、そのまま膨張し続けるのかを決定する、所謂暗黒物質の起源を探究するものもある。人類が永遠に持っている広大な宇宙への畏敬と、超微細世界への探究心とがそれぞれの進路を突き進んだところで共通の知識を要求しはじめていると言っても過言ではない。世界的にみてもこの種のニュートリノ実験は、2003 年米国をかわきりに欧州においても、現在わが国で先行して行われている研究を凌ぐ高いエネルギーや強度の強いニュートリノビームを生成した実験が開始する予定である。

ニュートリノは相互作用の断面積が非常に小さく、極めて貫通力の強い粒子である。従って、その検出には多大な努力が必要であり、且つ強度の強いニュートリノの発生が必須である。ニュートリノの持つ質量に関して決定的な結果を得るには、従つて非常に多くのニュートリノの発生が条件であり、これに沿って今米国或いは欧州において大強度ハドロン加速器を入射器としたニュートリノ工場（ニュートリノファクトリー）計画が検討されている。わが国においても現在の実験を進行させながら、将来的ニュートリノ実験に必要な色々な検討が始まりつつあるのが現状である。これらはそれぞれ各国で検討されているが、ニュートリノの質量に関し検出効率を上げる上ではその飛翔距離に大きく依存する為に、図 5.19 に示す様な地球規模での設備配置や実験計画がなされている。

Long Baseline Neutrino Oscillation Experiments on Earth-Scale

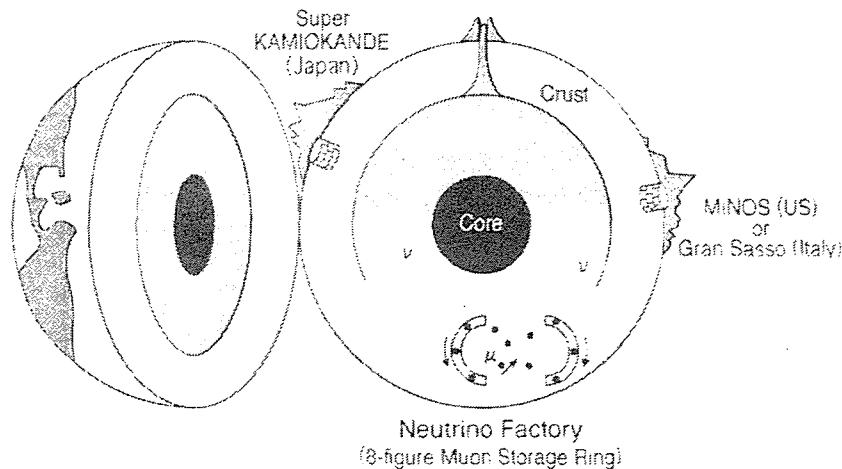


図 5.19 世界規模でのニュートリノファクトリーとその実験計画

大強度のニュートリノの発生には幾つかの技術的課題が立ちはだかっている。この発生は大別すると以下の様なプロセスに関わる研究が必要と考えられる。

1. 加速する陽子ビームの大強度化。
2. パイ中間子等ニュートリノ生成の親粒子の大量発生。
3. 発生したパイ中間子を強力に収束。
4. 飛翔中に素粒子崩壊を起こして転換したミュー中間子の収束。
5. ミュー中間子を大量に蓄積する技術。
6. ミュー中間子を極短時間で加速する技術。

大強度の陽子加速器は、ニュートリノ実験に限らず各種の中間子物理や核廃棄物処理などその応用分野は広く、世界各国でその検討が進められており、わが国においても大型ハドロン計画として設計が行われている。これまでの加速器技術を凌ぐ大強度の陽子を一時に加速する必要から、加速器そのものの技術的理論的再検討を要するのみならず、放射化に付随するさまざまな問題が精力的に研究されている。この種の加速器はその設計段階で色々な経験を持つ国際的な共同研究が必要ではあっても、その建設はおそらく一国で可能な規模であると考えられる。

6. まとめ

線形誘導加速器の開発研究として、1995年からファインメット（Fe基超微結晶質軟磁性合金）を磁性体として採用した大電流線形加速器 JLA（JAERI Large current Accelerator :2MeV-3kA,100ns）の開発を進めるとともに、1995年から2002年まで高勾配加速を目指す高エネルギー加速器研究機構および慣性核融合のエネルギーードライバーとして線形誘導加速器を用いたイオン加速の研究を行っている東京工業大学との共同研究を開始した。この7年間の共同研究の成果をこの章で総括する。

磁性体の磁化特性評価では、けい素鋼板、アモルファス合金、フェライトなどの強磁性体の磁化特性に関するデーター・ベースが確立された。線形誘導加速器のパルス幅として、1[μs]以下の運転では、ファインメットコア、パルス幅1[μs]以上の運転では、けい素鋼板が比透磁率の観点から有効であることが判明した。またファインメットコアを採用した場合、ギャップ電圧250kV-100nsでの最大繰返し運転としては、1kHzが可能であることがわかった。さらに高繰返化を目指すためには、低損失の強磁性体の開発が必要である。

磁性体に供給する高繰返しの高圧パルスモジュレーターとして、誘導加速シンクロトロンに応用するためにMOSFET素子を採用した回路設計が行われ、1MHzの高圧パルス動作が実証された。この誘導加速器では、1段のギャップ電圧として2.5kVであり、従来での誘導電圧の100分の1のレベルである。今後、さらに高電圧で高繰返しが可能な回路開発が必要である。

電子ビームの加速実験では、1~4MeVの範囲において1kA程度の加速制御に成功した。さらに1MeV-kA級の電子ビームを使って200MWレベルのマイクロ波発振に成功し、軸長さ1m程度のコンパクトな発振系として新たなBWO-FEL発振概念を提案した。この系においてはXバンドにおいて500MW~800MWレベルの発振が可能であり、大出力コンパクト発振系の開発に目処がついた。

イオン加速では、線形誘導加速器を使って外部からレーザー照射によるアブレーションプラズマから120kV-200mAのCuイオンビーム引出を実証した。さらに大電流のイオンを加速するためには、大電流化イオン源を独立に開発し、線形誘導加速と組み合わせた系が必要である。

既存の線形誘導加速器では、電子加速エネルギーを2MeVとした場合、電流1kA、パルス幅100ns、繰返し1kHzの運転が可能であることから電子ビームの平均エネルギーとして、0.2MJ程度となる。仮にXバンド500MWの発振に対しては、マイクロ波の平均エネルギーは、0.05MJとなる。この平均エネルギーは、加速器分野、地球環

境分野、宇宙分野においては、応用可能な範囲である。また核融合分野のイオン加熱や高周波加熱に適用するには、あと2桁以上の平均エネルギーが必要であるが、今後さらに低エネルギー損失の強磁性体の開発や数10kHz以上のスイッチング素子の開発が進めば、低コスト化およびコンパクト化の面で優位になる。特にイオン加熱用の加速器としては、現在の静電型加速器では1MeV程度の耐電圧が限度と考えられており、実証炉で要求されている1.0~1.5MeVのイオン加速としては、RFQによる加速よりも誘導加速器の方が、大電流化、高効率化、低コスト化、コンパクト化において格段に優れている。今後、核融合分野での応用を可能にするためには、低エネルギー損失の強磁性体の開発と数10kHz以上のスイッチング素子の開発が重点課題である。

加速器分野では、RFシンクロトロンに代わり新たな概念である誘導型シンクロトンが提案された。10kVの誘導加速器を用いて高繰返し運転を応用してイオンビームのエネルギーを8GeVまで加速することが計画されている。従来、高エネルギー領域まで加速するには膨大な数の誘導加速器が必要とされたが、誘導型シンクロトンでは、イオンを循環させることにより1台の線形誘導加速器により高エネルギーまで加速することができる可画期的な発案である。誘導型シンクロトンにおいて、イオンビーム加速が実証されれば世界で始めてのことであり、将来の加速器システムの概念設計が大きく変わる可能性がある。

核融合分野や加速器分野において、次世代の設計が開始してきた。次世代の設計では、如何にコンパクト化および低コスト化を図り、高性能化および高効率化を目指すかが重要な課題である。線形誘導加速器を用いた加速技術や大出力高周波源は、コンパクト化および低コスト化に十分対応できる可能性があり、今後10年あたりがもっとも興味深い時期と思われる。

謝辞

大電流線形誘導加速器（JLA）の開発研究、また関係する大学および国立研究機関との共同研究の実施にあたり、暖かいご支援と励ましを頂いた日本原子力研究所岸本浩元理事、島本進那珂研究所前所長、太田充那珂研究所前所長、松田慎三郎理事、関昌弘那珂研究所長、関省吾核融合工学部長、今井剛加熱工学研究室長に深く感謝します。

参考文献

- [1] K.Sakamoto,M.Shiho et al.,J.of AppliedPhys,75,36-42(1994)
- [2] K.Sakamoto, M.Shiho et al.,Phys. Rev.Lett, 70,441-444(1993).
- [3] K.Takayama,J.Kishiro et al.,J.of Applied Phys.,77,5467-5469 (1995)
- [4] K.Saito, K.Takayama et al., Nucl. Inst. Meth. A375, 237-240 (1996)
- [5] X.D.Zheng,I.Morimoto et al.,Procc.of 13th Inter. Conf. on High-Power Particle Beams, Nagaoka,Japan,June 25-30,2000.
- [6] I.Morimoto, X.D.Zheng et al., Proc. of 22nd Inter. Free Electron Laser Conf, Durham, North Carolina, USA,August 13-18, 2000.
- [7] I.Morimoto, S.Kawasaki et al., J. Plasma Fusion Res. Vol.78, No.6(2002)493-494
- [8] M.Shiho,S.Kawasaki et al., Nucl. Inst. Meth. A341, 412-416 (1994)
- [9] M.Ogawa, U.Neuner et al., Fusion Eng. & Design, 44, pp.279-283 (1999)
- [10] M.Yoshida, J.Hasegawa et al., Nuclear Instr. Meth., A-464, pp.582-586 (2001)
- [11] K.Horioka, J.Hasegawa et al., Nuclear Instr. Meth., A415 pp.291-295 (1998)
- [12] 橋本 大、森本 巍 等、JAERI-Research、2000-018
- [13] M.Watanabe, M.Nakajima, et al., Rev. Sci. Instr., Vol.73, pp.1756-1760 (2002)
- [14] M.Watanabe, M.Nakajima, et al., Nuclear Instr. Meth., A-464, pp.440-444 (2001)
- [15] K.Horioka et.al., Proc.12th High Power Particle Beams, Vol. II, p.927 (1998)
- [16] K.Horioka, M.Nakajima et al., Laser and Particle Beams, 20, pp.609-612 (2002)
- [17] K.Takayama, 14th Smp. Acc. Sci. Tech., Tsukuba, Japan, Nov. 2003, p53-57.
- [18] K.Koseki et al., Proc. PAC2003, ROAC011.
- [19] S.Maebara, I.Morimoto et al., Proc. 13th High Power Particle Beams (Beam 2000), PC-086
- [20] J. Hasegawa, M. Yoshida et al., Nucl. Instr. Methods, B 161-163 (2000) 1104-1107
- [21] M. Ogawa, M. Yoshida et al., Laser and Particle Beams 21 (2003) in press
- [22] W.B.Herrmannsfeldt, SLAC-Report-331,UC-28,1988.
- [23] S.Maebara, X.D.Zheng et al., (to be published)
- [24] S.Maebara, X.D.Zheng et al., (to be published)
- [25] S.L.Allen, K.Hoshino, K.Oasa et al., Phys.Rev.Lett.72(1994)1348.
- [26] K.Hoshino, J.Nucl.Sci.Tech. 27 (1990) 391
- [27] T.D.Rognlien,Phys.Fluids26(1983)1545.W.M.Nevins,T.D.Rognlien,B.I.Cohen, Phys.Rev.Lett. 59(1987)60, B.I.Cohen et al., Rev. Mod. Phys.63(1991)949, R.H.Cohen, T.D.Rognlien, Phys.Fluids B3 (1991) 3406
- [28] C.J.Lasnier et al., in Proc.1993 IEEE Particle Accereletor Conf., Wasington,DC.
- [29] J.M.Paterson et al., Proc. 15th Int. Conf. High Energy Accelerators, Hamburg, Germany, July, 1992, World scientific, Singapore(1992)815.
- [30] A.M. Sessler, Proc. Workshop on Laser Accelerator of Particles, AIP Conf. 91(1982)154.
- [31] T.Houck et al., Contribute Paper, RF 96, April, 1996, Hayama, Japan.
- [32] K.Takayama and J.Kishiro, Nucl. Inst. Meth. A451/1.304(2000)

- [33] K.Takayama and J.Kishiro: : Particle Accelerators (to be published)
- [34] J.Kishiro, K.Takayama, E.Nakamura, K.Koseki, K.Horioka, M.Nakajima, M.Watanabe;
Induction Accelerating Device for Superbunch VLHC; Proc. Snowmass 2001, (2001)
- [35]K.Takayam et al., Proc. of PAC2003, TPPB093.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
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
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

換算表

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	1bf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)	
								1	= 4.184J (熱化学)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.184J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1855J (15°C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1868J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		= 735.499W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

大電流線形誘導加速器の開発研究



古紙配合率100%再生紙を使用しています