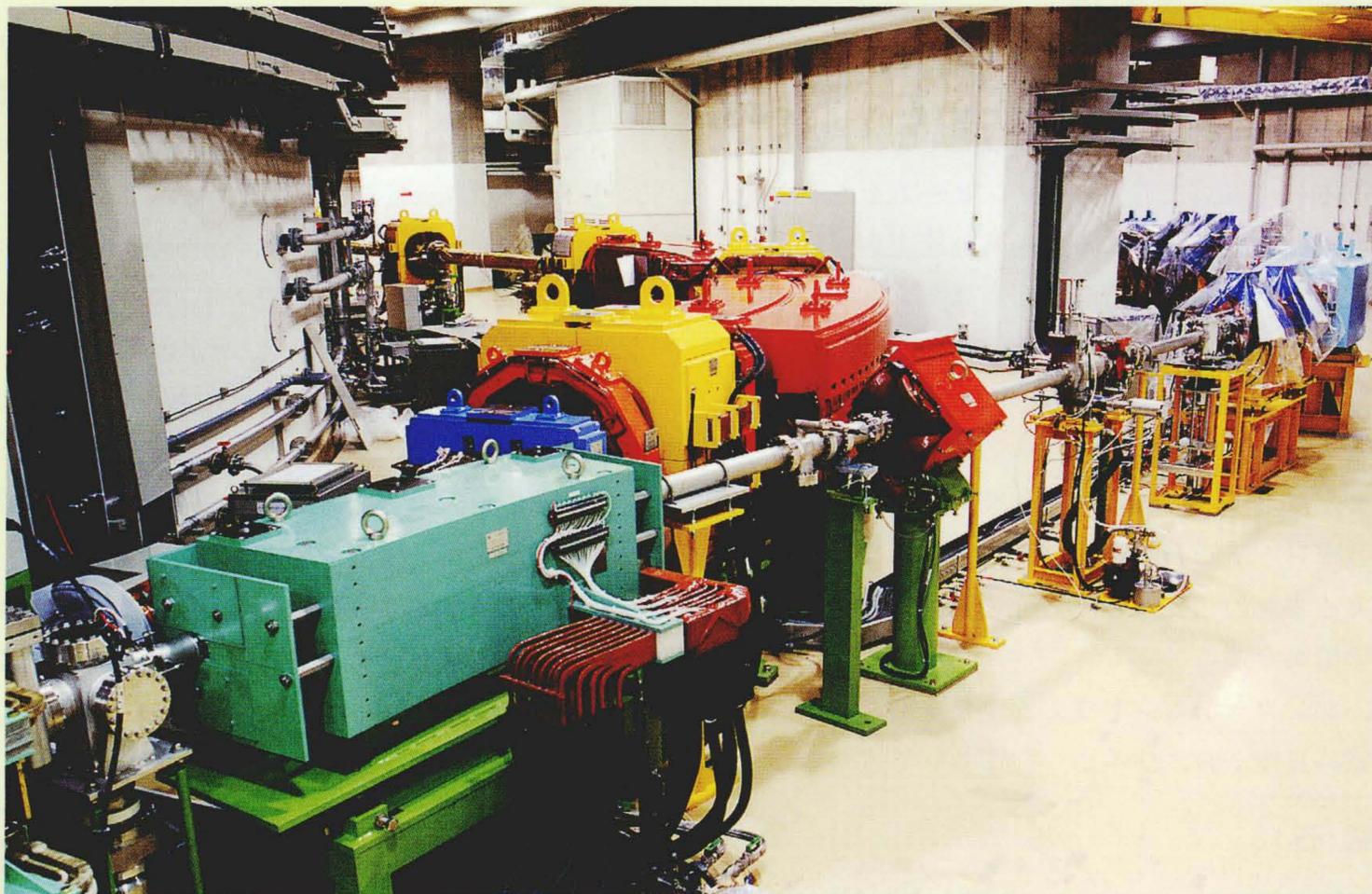


# シンクロtron本体技術

—電磁石・高周波・真空・イオン源—

Technologies on Components of Synchrotron Systems  
-Magnets, High Frequency Cavities, Vacuum Systems, Ion Sources-

垣内俊二\* *Shunji Kakiuchi*  
小針利明\*\* *Toshiaki Kobari*  
登木口克美\*\*\* *Katsumi Tokiguchi*



## 放射線医学総合研究所納めの“HIMAC”シンクロtron

HeからArまでの重イオンビームを1核子当たり最大800 MeVまで加速して取り出すことができる医療用重イオンシンクロtronを示す。

日立製作所は、シンクロtron本体技術の開発を1960年代のシンクロtron用電磁石の製作からスタートし、現在はシンクロtronを構成するあらゆるコンポーネントの製作実績を持っている。この間、日立製作所は、高エネルギー物理学研究所納めのトリスタン用偏向・四極電磁石、日本電信電話株式会社納めの超電導電子蓄積リング、放射線医学総合研究所納めのHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) シンクロtron用主電磁石・モニタ、理化学研究所納めのSPring-8用偏向電磁石・偏向部超高真空ダクトなどのわが国で最も重要な加速器プロジェクトや最先端への挑戦に積極的に参加して

きた。また、半導体製造装置に関連するイオン源の開発にも注力してきた。

これらのコンポーネント技術は、加速器システム設計技術をはじめ、電磁界解析・構造解析・高周波解析などのソフトウェア、高精度かつ量産加工を可能とする生産技術、および高信頼性を確保する検査技術の革新的な進歩に支えられて発展してきた。その結果、今日では各種シンクロtronのシステム設計・製作へと展開することが可能となり、高エネルギーイオンビームの医療への応用をはじめ、幅広い分野での社会への寄与が期待できる。

\*日立製作所 日立工場 \*\*日立製作所 研究開発推進本部 \*\*\*日立製作所 電力・電機開発本部

## 1. はじめに

シンクロトロンは、より高いエネルギーのイオンビームをより少ない空間と物量で獲得することを目的に、サイクロトロンから発展した加速器である。等時性サイクロトロンによる相対論効果の壁を乗り越え、高周波の位相安定性に立脚したシンクロトロンは新たな高エネルギー物理学の分野を開いてきた。最近、高エネルギーのイオン・電子ビームを利用して、本来の物理学研究に加え、工学、生物、医学への応用が急速に進んでいる。

シンクロトロンは、主に高エネルギーイオンビームを電磁力で安定な周回軌道に保持する偏向電磁石、四極電磁石等の電磁石、周回軌道上のイオンビームを1周ごとに高周波電圧によって加速する高周波加速空洞、およびイオンが数百万回以上周回可能な超高真空システムで構成する。

日立製作所は、発電機の磁気コア、コイル技術を基に、長年にわたって加速器の電磁石を供給してきた実績を持っている。また最近、加速器技術を社内のリーディング技術に位置づけ、電磁石だけでなく真空さらにはイオンを生成するイオン源へとそのすそ野を広げ、加速器トータル技術の構築を進めている。

ここでは、シンクロトロンを支える主要技術である電磁石、高周波、真空、およびイオン源について述べる。

## 2. 電磁石

シンクロトロンの電磁石には、イオンの軌道を偏向する偏向(二極)電磁石、イオンビームに収束・発散力を与えて安定な周回運動をさせる四極電磁石、色収差を補正したりイオンをシンクロトロン外に取り出すのに必要な周回運動の共鳴現象を誘起する六極電磁石などが用いられる。

シンクロトロンでは、あらかじめエネルギーを与えられた入射ビームを周回軌道上に捕獲した後、偏向電磁石と四極電磁石の磁場強度をある決められた関係で時間とともに強め、どのエネルギー状態でも同じ周回軌道上にイオンを保持しながら高周波加速空洞によって周回ごとにエネルギーを与えて高エネルギービームを生成する。一般に、イオンビームはシンクロトロンを数百万回転以上周回する。したがって、偏向電磁石や四極電磁石には、広くかつ高精度の磁場分布が要求される。これは、電磁石の“good field”領域と呼ばれる量で表され、代表的には±数十から百数十ミリメートルの領域で、±0.02～0.05%以内の高い磁場精度が必要である。これを実現す

るためには、磁気コアとコイルの二つの設計が必要となる。始めに、数値シミュレーションによって磁気コアの鉄心形状とともに、必要なコイルの電氣的仕様を決定する。次に、決められた電気仕様を満足するコイルの構造を決定する。これらを組み立てて実際に励磁を行い、磁場を測定し、電磁氣的特性を確認して製品とする。

これまで日立製作所は、高エネルギー物理学研究所の電子・陽電子衝突リング“TRISTAN”，放射線医学総合研究所の重粒子がん治療装置“HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)”のシンクロトロンに偏向電磁石や四極電磁石などを納入している。HIMACに納入した最大磁場1.5 Tの偏向電磁石と最大磁場こう配34.1 T/m<sup>2</sup>の六極電磁石を図1に示す。

これらの電磁石は、厚さ0.5 mmのケイ素鋼板を積層した積層鉄心を用いたものである。これらの電磁石が、上述した“good field”領域で所定の磁場性能を出して、初めてシンクロトロンで高エネルギーイオンを生成することが可能となる。このためには、数値シミュレーションで十分に検討することはもちろんのこと、製作段階でも厳密な品質保証技術が要求される。

またHIMAC偏向電磁石では、放射線医学総合研究所の指導の下、積層・セクター型とし、エンド部の調整を行うことにより、“good field”領域の拡張および対称性

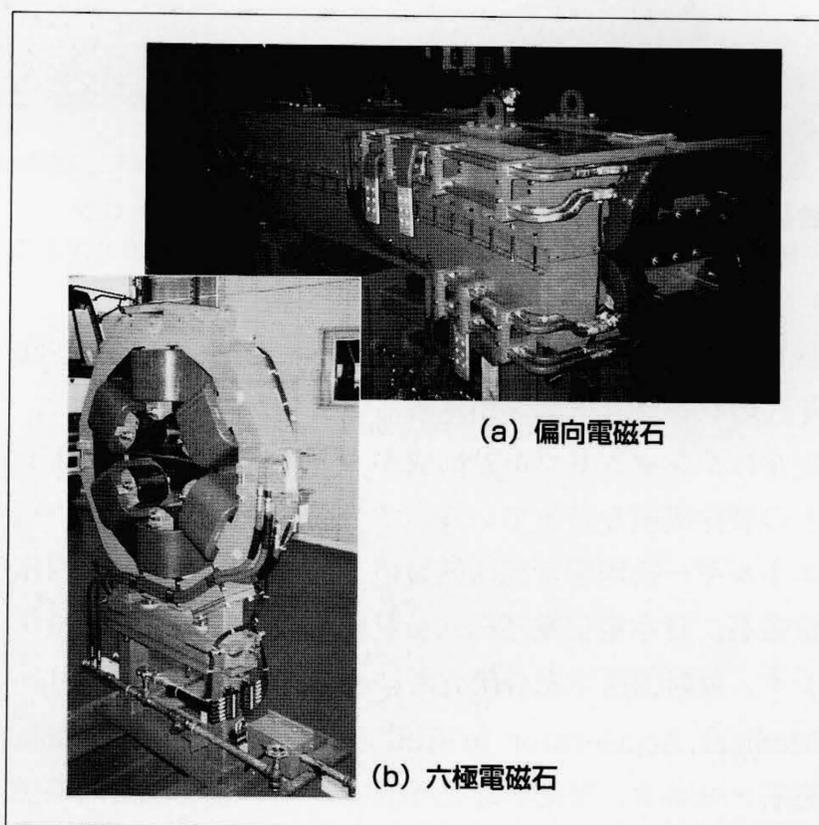


図1 放射線医学総合研究所納めのHIMACシンクロトロン用電磁石

偏向電磁石(最大磁場強度1.5 T, 偏向角30°, 偏向半径6493.5 mm)を(a)に、六極電磁石(最大磁場こう配34.1 T/m<sup>2</sup>, 鉄心長100 mm)を(b)に示す。

を向上する方法を確立している。

これらの大型シンクロtronで経験した電磁石技術は、陽子線がん治療システムなどの小型シンクロtron用に新たに設計した、パターン運転される常電導磁石として最高磁場を持つ偏向半径1.3 m、最大磁場1.8 Tの偏向電磁石に生かされている。

### 3. 高周波加速空洞

シンクロtronでは、イオン加速に高周波電圧を発生させる高周波加速空洞が必要となる。また、陽子以上のイオンを加速する場合、イオンはその質量が重く相対論効果が現れるため、加速されるにしたがって加速空洞に到達する時間が短くなる。このため、イオン加速を行う加速空洞には、高周波電圧を発生することのほかに、広い周波数領域で動作することが求められる。日立製作所は、将来の小型化や運転の容易化のニーズにこたえるために、空洞共振器内に磁性体を装荷し、磁性体の透磁率の虚数部による電力ロスを利用して動作周波数の広帯域化を行い、容易に空洞制御ができる非同調型加速空洞に着目し、開発してきた。

空洞内に装荷する磁性体としては、高複素透磁率を持ちキュリー点の高い安定な磁性体である、日立金属株式会社製のファインメットコアを用いて使用周波数領域を広げた。さらに、発生する高周波電圧を高電圧化するために、空洞内部に装荷したファインメットコアごとに電力を供給するマルチフィード型非同調空洞を、京都大学化学研究所の指導を受けて新たに開発した。開発し

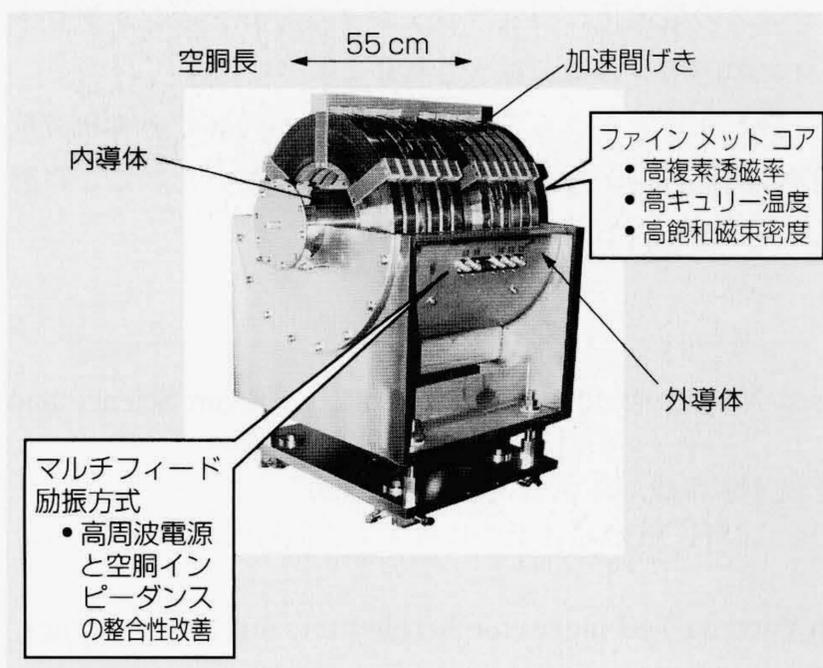


図2 マルチフィード型非同調空洞

周波数帯域が0.5~30 MHz、加速電圧が1 kV以上でファインメットコアを12枚装荷した空洞を示す。

たマルチフィード型非同調空洞を図2に示す。この空洞の動作周波数は、ファインメットコアを12コア装荷した場合、0.5~30 MHz、コア時の入力電力100 W、1.0~1.5 kVであり、空洞長55 cmの小型加速空洞として十分な広帯域、高電圧を達成した。この加速空洞は、マルチフィード励振による高電圧化の成功により、小型シンクロtronはもとより、これまで高電圧が必要であるために非同調型では難しいとされた大型のシンクロtronへの応用も可能となる。

また非同調型空洞では、磁性体の持つ複素透磁率だけで広帯域化を行っているため、同調型加速空洞で必須であったバイアス回路を不要とすることができる。そのため、シンクロtron加速時の複雑な同調操作が大幅に軽減できる利点も持っている。これにより、シンクロtron運転を容易に行うことができると考える。

### 4. 真空システム

加速器システムでは、荷電粒子が通過する領域は高真空に保たなくてはならない。特に、シンクロtronやストレージリング(蓄積リング)のように、同じ周回軌道を多数回まわる加速器では、残留分子との散乱によってビームが失われないように、高真空は特に重要である。

シンクロtronでは $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$  Paの高真空が、蓄積リングでは $\sim 10^{-8}$  Paの超高真空が要求される。この要求にこたえるため日立製作所は、各種材料表面からのアウトガス測定などの基礎実験を行い<sup>2)</sup>、各種真空ポンプを開発している<sup>3)</sup>。兵庫県に設置される第3世代放射光リングSPring-8(Super Photon Ring-8GeV)に納入した偏向部の真空ダクトと、その真空ダクトに内蔵されるDIP(Distributed Ion Pump: 分布型イオンポンプ)を、図3、図4に示す。このダクトにはDIPのほかにNEG(Non-evaporable Getter Pump)が組み込まれ、 $\sim 10^{-8}$  Pa

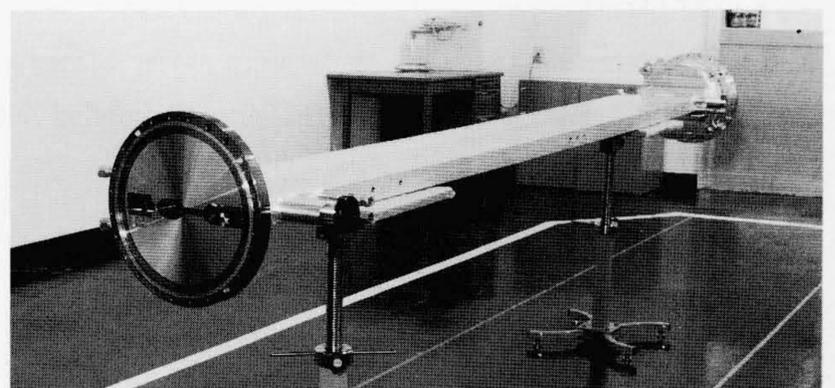


図3 SPring-8用偏向部真空ダクト

アルミ合金(A6063T5)製で断面が54×303(mm)、偏向角4.1度、偏向半径が39.272 mmの真空ダクトを示す。

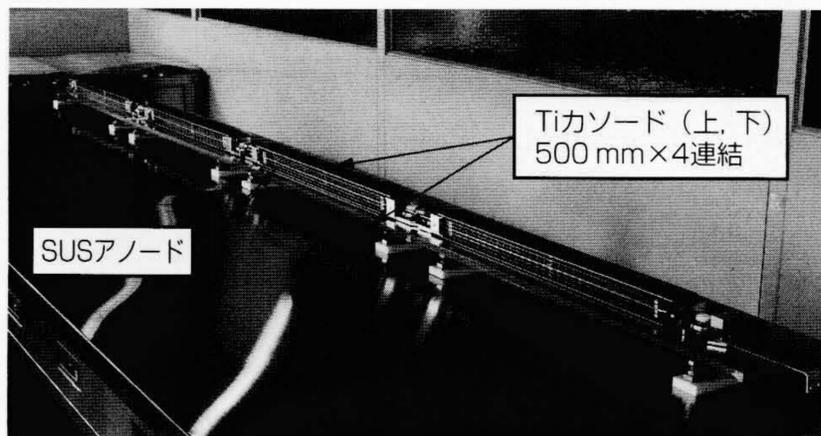


図4 SPring-8用DIP

カソードがTi(2枚), アノードがSUS(5枚), 排気速度が $0.15 \text{ m}^3/\text{Sec} \cdot \text{m}$  at  $1.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ のDIPを示す。

の超高真空が達成されて、電子ビーム蓄積時間20時間以上を実現する見通しである<sup>4)</sup>。このような超高真空を達成するため、専用クリーンルームの設置や製作工程の厳しいチェックなど、製造段階でアウトガスの要因となるちりやごみの混入を極力防ぐ生産技術が確立されている。

また、 $10^{-11} \text{ Pa}$ の超高真空を世界で初めて実現するなど、測定技術の開発を並行して行い、品質保証に万全を期している。

## 5. イオン源

シンクロトロンシステムは、入射に必要なエネルギーまであらかじめ加速されたビームを必要とする。ガスまたは金属の状態からイオンビームを生成するのがイオン源である。

日立製作所は、さまざまなイオン種を生成することが可能なECR(Electron Cyclotron Resonance)型イオン源を開発している。さらに、加速器の入射用だけでなく、イオン源単体でも半導体のイオン打込みなどの工学利用ができるように、大電流のイオンビームを引き出すことが可能な非共振型のECRイオン源(マイクロ波イオン

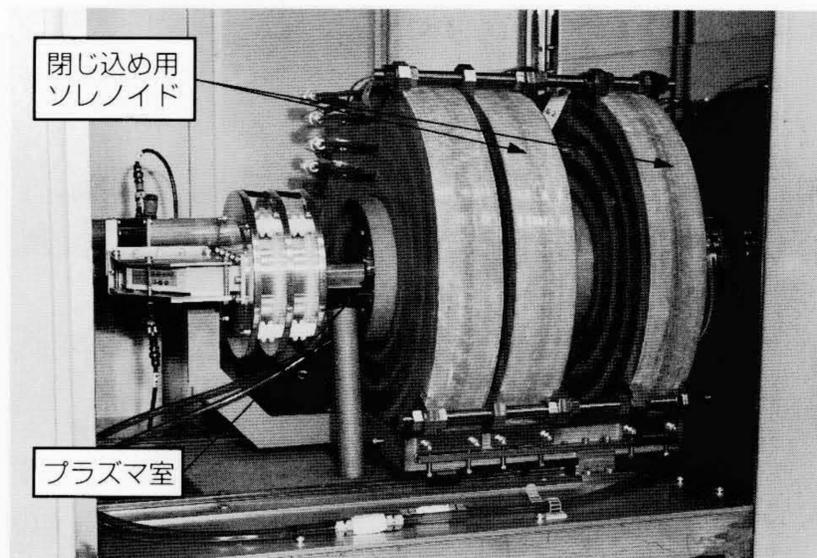


図5 マイクロ波イオン源

生成イオン種がN, O, Al, Si, P, Ar, Krで、マイクロ波周波数が2.45 GHz、電力最大1.2 kWのマイクロ波イオン源を示す。

源)を開発した。マイクロ波イオン源を図5に示す。同図中、左側からマイクロ波がソレノイドコイル内のプラズマ室に導入され、ソレノイド型磁場でのサイクロン運動によって電離され、プラズマ化する。その後、マルチホール型の引き出し電極により、1価のビームとして引き出される。例えば、半導体注入に最もよく使用されるリンイオンなどで、100~150 mAの連続ビーム(現段階で世界最高強度)を引き出すことができる。

## 6. おわりに

ここでは、シンクロトロン本体を構成する主要コンポーネントである電磁石・高周波・真空・イオン源について述べた。これらについては、最先端の要求にこたえる技術が確立している。最近では、高度技術とコストバランスの最適化により、さまざまな分野へのシンクロトロンへの道が拡大している。

終わりに、これらの技術開発では、顧客である研究機関の関係各位から多大なご指導をいただいた。ここに感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) K. Saito, et al. : An Untuned RF Cavity Loaded with Fe-based Nanocrystalline FINEMET Cores, Beam Science and Technology, Kyoto Univ., 2(1996)
- 2) 松本, 外 : ステンレス鋼, アルミニウム合金および無酸素銅からの光刺激脱離, 真空, 33-3, 286(1990)
- 3) 平野, 外 : Spring-8蓄積リング用分布型イオンポンプの $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ および $\text{H}_2 + \text{CO}$ 混合ガスに対する排気特性, 真空, 38-8, 722(1995)
- 4) H. Ohkuma, et al. : Proceedings of 9th Meeting on Ultra High Vacuum Techniques for Accelerators and Storage Rings, KEK, Japan, 29~45(1994)
- 5) Tokiguchi, et al. : Measurement of Input Beam Emittance to Obtain MeV, mA-class Heavy Ion Beams in a VERFQ Linac, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 363, 153~158(1995)