

「大強度粒子線応用とその加速器

服部俊幸

放射線医学総合研究所(東京工業大学)

目次

大強度粒子線加速の背景と可能性

- 1-1.大強度粒子線加速に対する新ブレークスルー
- 1-2. 医療用大強度粒子線応用の新しい可能性

2.本研究の目的

- 2-1.大強度粒子線用応用加速器の開発研究
- 2-2.大強度粒子線用応用基礎開発研究
- 2-3.大強度粒子線用応用開発研究
- 2-4.大強度粒子線利用事業

3.医療応用粒子線加速器の開発研究及び事業

4.大強度粒子線加速器研究と応用研究及び事業

大強度粒子線加速の背景と可能性

1-1.大強度イオンビームに対する21世紀のブレークスルー

東工大重イオンRFQ線形加速器でレーザーイオン源を利用した直接プラズマ入射法(DPIS)の原理実証が2001年炭素10mA加速に成功し、2004年テスト機で60mA加速に成功した。インターゲジナル-H(IH)型空洞に2組の4ロッドのRFQ加速構造を挿入した2ビームRFQ-IH型線形加速器でDPIS法を使って炭素2価を108mA加速することに2009年成功した。1台のRFQ-IH加速空洞で400mA以上のビームを低エネルギーから加速することが可能となった。

これは大強度イオンビーム加速に対する21世紀のブレークスルーである.....

1-2. 大強度粒子線応用の新しい可能性

これまでの加速器からのビーム強度、特に陽子以外のビーム強度は弱く基礎物理研究は可能でも実際に人類に役立つことは、重イオンがん治療加速器と医療用放射性同位元素(RI)等を除き非常に少なかった。 服部の重イオンがん治療加速器の開発研究.....

中エネルギー大強度軽イオンビームの核反応による医療用を含む有効同位元素をこれまでの1000~10000倍効率よく製造できる。

中エネルギー大強度重イオンビームのプロジェクティルフラクメント反応による有効同位元素の製造が可能と考えられる。これらの可能性はこれからの重イオン核物理の発展によるところがあり発展の可能性は計りしれない。

中エネルギー大強度重イオンビームは重イオン慣性核融合に対して、基礎研究でさえ21世紀も無理と思われていたが、21世紀に慣性核融合に対するブレークスルーが確実に起こる。.....

2.本研究の目的

日本で発明された2つの大強度イオンビーム加速のブレークスルー技術を人類に役立てることを目的とする。

医療、産業応用を事業の1つの柱として、研究の運営経費のかなりの部分を当てる新しい運営形態を特長とする。

2-1.大強度粒子線用応用加速器の開発研究

2-2.大強度粒子線用応用基礎開発研究

2-3.大強度粒子線用応用開発研究

2-4.大強度粒子線利用事業

3.医療応用粒子線加速器の開発研究及び事業

A.普及型重粒子線がん治療加速器のさらなる開発研究

- A-1.重粒子線がん治療用炭素6価DPIS法加速小型線形加速器の開発研究
- A-2.常伝導型強磁場発生磁石による小型重粒子シンクロトロンの開発研究
- A-3.粒子線輸送トランスポート、ガントリー磁石の超伝導化研究
- A-4.PET用核子 ^{10}C 、 ^{11}C 加速炭素がん治療装置の開発研究

B.新型・小型重粒子線がん治療加速器の開発研究

- B-1.高温超伝導強磁場発生磁石による小型重粒子シンクロトロンの開発研究
- B-2.超伝導磁石型、重粒子FM型及びAVF型サイクロトロンの開発研究
- B-3.大強度粒子線加速法(DPISとMulch RFQ-IH法)によるマルチがん治療用加速器の研究
- B-4.スポットスキャン型新型加速器(FFAGを含む)の開発研究

C.未来型超小型重粒子線がん治療加速器の開発研究

- C-1. ECR-IPAC重粒子線加速器の開発研究
- C-2. ERAによる重粒子線加速器の開発研究

D.ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)加速器システムの開発研究

E.既存及び全く新しい同位体製造に関する大強度加速器及应用装置開発研究

- E-1.大強度軽イオン中エネルギー粒子線利用(陽子、重陽子、3重陽子、 3He 、 4He ,...)
- E-2.全く新しい方法による(大強度粒子線によるプロジェクトイル・フラグメンテーション)
有効同位体元素の製造

4.大強度粒子線加速器研究と応用研究及び事業

A.大強度軽粒子線応用

A-1低エネルギー陽子線利用

半導体ウエハー用陽子ナノカッター法

B.大強度軽粒子線により発生する中性子の利用

B-1高性能半導体シリコン基盤の製造に低エネルギー中性子の利用

B-2中性子による有効同位元素の製造

C.大強度重粒子線応用

C-1低エネルギー重粒子線利用(パルス、CW駆動応用加速器)

超高エネルギー重イオン注入器による半導体への注入

C-2中エネルギー重粒子線利用(パルス駆動応用加速器)

重イオン慣性核融合とその基礎研究装置への利用

3.医療応用粒子線加速器の開発研究及び事業

A.普及型重粒子線がん治療加速器のさらなる開発研究

A-1.重粒子線がん治療用炭素6価DPIS法加速小型線形加速器の開発研究

がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器。小型、省電力大強度入射線形加速器の研究。

.....

A-4.PET用核子 ^{10}C 、 ^{11}C 加速炭素がん治療装置の開発研究

治療照射粒子がどこで停止したかを正確に検出する方法は短半減期のPET用RI核種を加速して患者に照射し、PET装置で検出することである。しかし未だにPET用RI核種を効率良く加速する研究を行う。

これまでの服部の重イオンがん治療加速器の開発研究.....

A. 普及型重粒子線がん治療加速器のさらなる開発研究

A-1. 重粒子線がん治療用炭素6価DPIS法加速小型線形加速器の開発研究

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

Study of Hattori Lab. for Ion Linear Accelerator

RFQ Linac :9 DT Linac :9 Synchrotron : 2 New electron accelerator :1 C60 accelerator:1

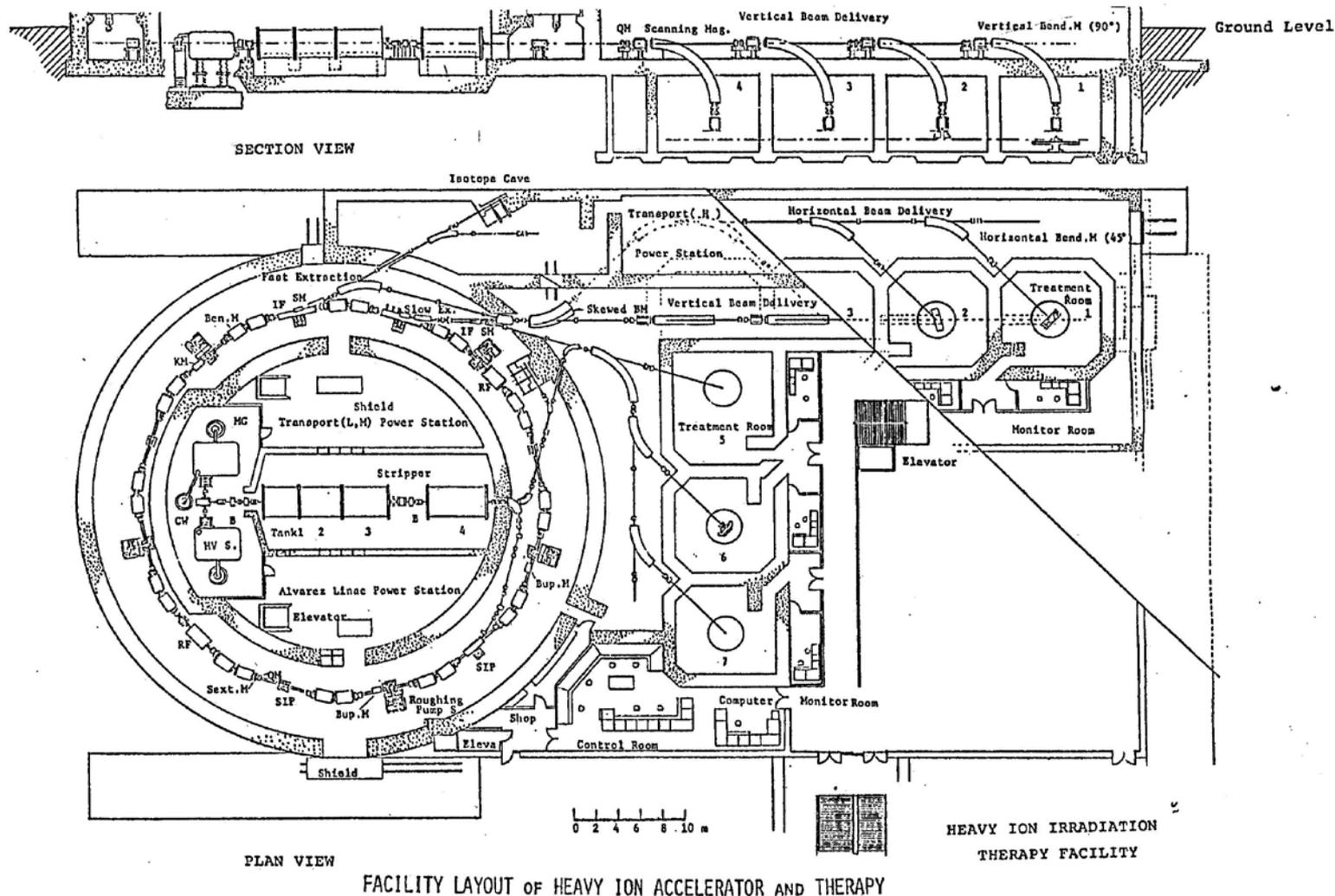
- 1.(1982)Heavy ion 4vane RFQ Linac (LITL) $A/Q=7$, 5keV/u to 100keV/u, 100MHz, Design, Const., Acc.
- 2.(1983) POP INS type IH Linac $A/Q=4$, 10keV/u to 160keV/u, 100MHz, Design, Const., Acc.
- 3.(1984)Titech IH Linac for HI irradiation, $A/Q=4$, 240keV/u to 2.4MeV/u (p Cl), Design, Const., Acc.
- 4.(1985)Test Medical 4vane RFQ Linac $A/Q=7$, 7keV/u to 0.8MeV/u, 100MHz, Design, Const., Acc.
- 5.(1986)Titech 2nd IH Linac for HI irradiation, $A/Q=4$, 2.4MeV/u to 3.4MeV/u, Design, Const., Acc.
6. (1988)POP-IHQ Linac, Proton 0.8MeV to 2MeV, 100MHz, Design, Construction, Acceleration
- 7.(1984-96)SC-RFQ (POP,Test, RI acceleration) $A/Q=28$, 2.1keV/u to 178keV/u, Design, Const., Acc.
- 8.(1993)Compact Storage Electron ring for Free Electron Laser, 300MeV, 100MHz Design, Const.
- 9.(1994)Deuteron(3.4) IH Linac for PET-RI, $A/Q=2$, 100keV/u to 1.7.MeV/u, Design, Const., Acc.
- 10.(1994)Titech Heavy ion 4 vane RFQ Linac, $A/Q=16$, 5keV/u to 220keV/u, 80MHz, Design, Const., Acc.
- 11.(1997-09)Fullerene C60 Accelerator, 200eV to 300keV, Design, Const., Acc.
- 12.(1998)IHQ Linac for Semiconductor, $A/Q=16$, 20keV/u to 120keV/u, 33MHz, Design, Const., Acc.
- 13.(1999)POP of APF-IH Linac for heavy ion, 10 to 90keV/u, Design, Const., Acc.
- 14.(2000)POP of Electron Accelerator(Ridgetron) for Sterilization, $E_e=2.5$ MeV, 2.8mA, Design, Const., Acc.
- 15.(2003)Siberian Snake Magnet of BNL-AGS Synchrotron for Polarized Proton, Design, Const., Acc.
- 16.(2004)Test 4 rod RFQ Linac by DPIS with C4+ Laser ion source, 60mA, Design, Const., Acc.
- 17.(2004)APF-IH Linac for Cancer Therapy of C4+, 60keV to 2MeV, Design, Const., Acc.
- 18.(2008)APF-IH Linac for CW Heavy ion Implanter P1.5MeV, Design, Const., Acc.
- 19(2009) POP 2 beam RFQ-IH Linac for multi-beam, 5keV/u to 60keV, C2+108mA, Design, Const., Acc.
- 20.(2010)POP of Hybrid Single Cavity(RFQ+DT) Linac for C cancer therapy, 0.05 to 24MeV, Design, Const.
- 21.(2011) Variable Energy Implanter of APF-IH Linac, B1.7MeV, 65MHz, Design, Const.,

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

Design of heavy ion cancer therapy system

1st Design study of heavy ion cancer therapy system(HIMAC) (at INS 1979)

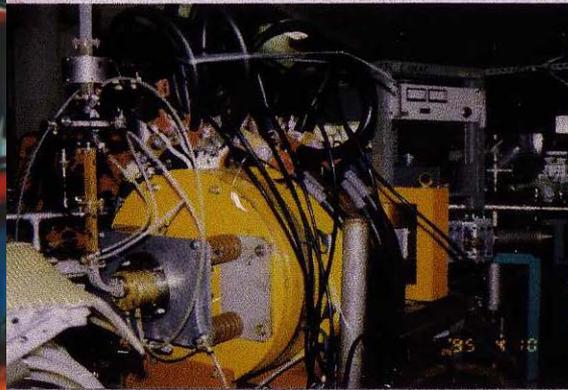
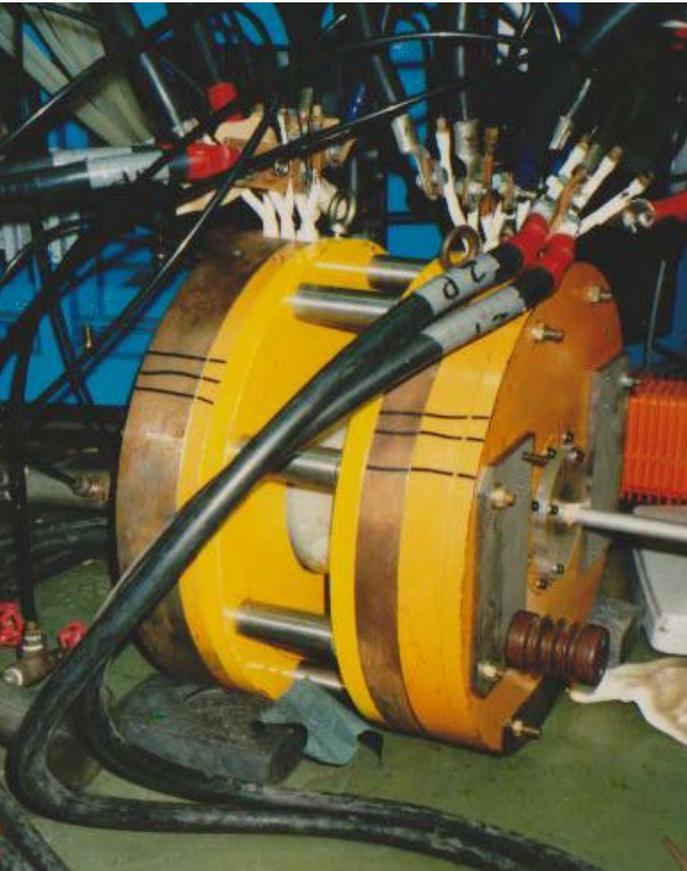
Design study of ECR ion source and Injector Linear accelerator at Titech(-1990)



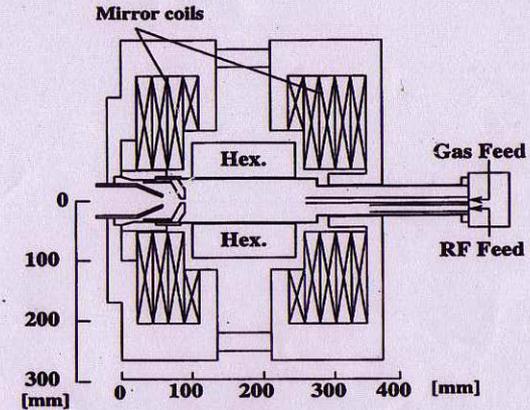
服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

HiECR Ion Source

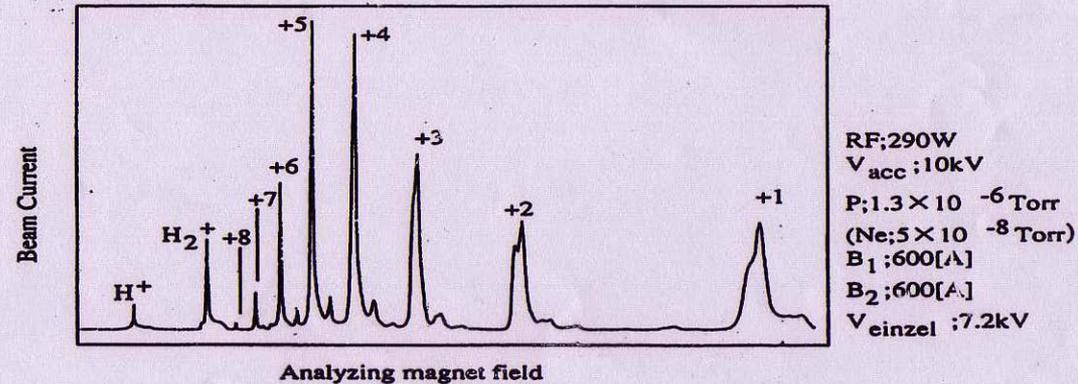
- 15.(1988-91)6.4,10GHz ECR Heavy Ion Source 多価ECR重イオン源 Suzuki, Hirata
- 23.(1994)14GHz ECR Heavy Ion Source Katayose
- 43.(2004) ECR Ion Source, Cavity resonance freq. vs Mulch Charge Ion Takano



ECRイオン源



断面図



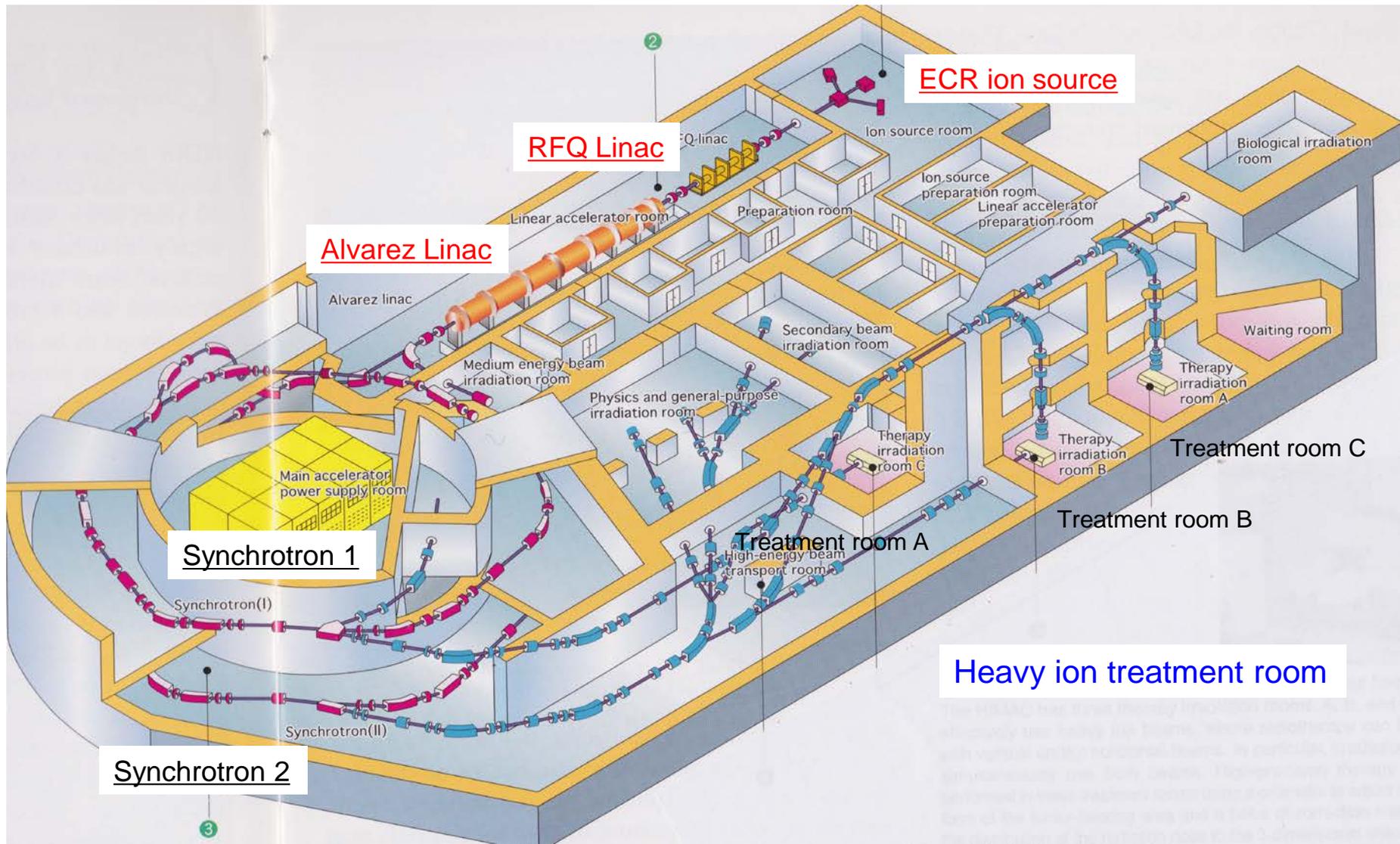
Ne イオンスペクトル

HiECR Ion Source

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

8.(1987-90) Design study of Injector Linear accelerator and ECR ion source for HIMAC

1st dedicated Synchrotron Facility for Heavy Ion Cancer Therapy(HIMAC) 1993



服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

1st dedicated Synchrotron Facility for Heavy Ion Cancer Therapy(HIMAC)

(1987-90) Design study of Injector Linear accelerator and ECR ion source for HIMAC

HIMAC, the first machine for heavy ion radiotherapy in the world

HIMAC is the first machine in the world specially constructed for researches on heavy ion radiotherapy. The mission of HIMAC is to verify the effectiveness and safety of carbon ion radiotherapy and to develop new medical technologies. HIMAC consists of various instruments shown below.



Alvarez Linac

③ Alvarez Linac

Linear accelerator for medium speed ions. Length:24 m/up to 11% of the light speed



RFQ Linac

② RFQ Linac

Linear accelerator for low speed ions. Length:7.3m /up to 4% of the light speed



ECR IS

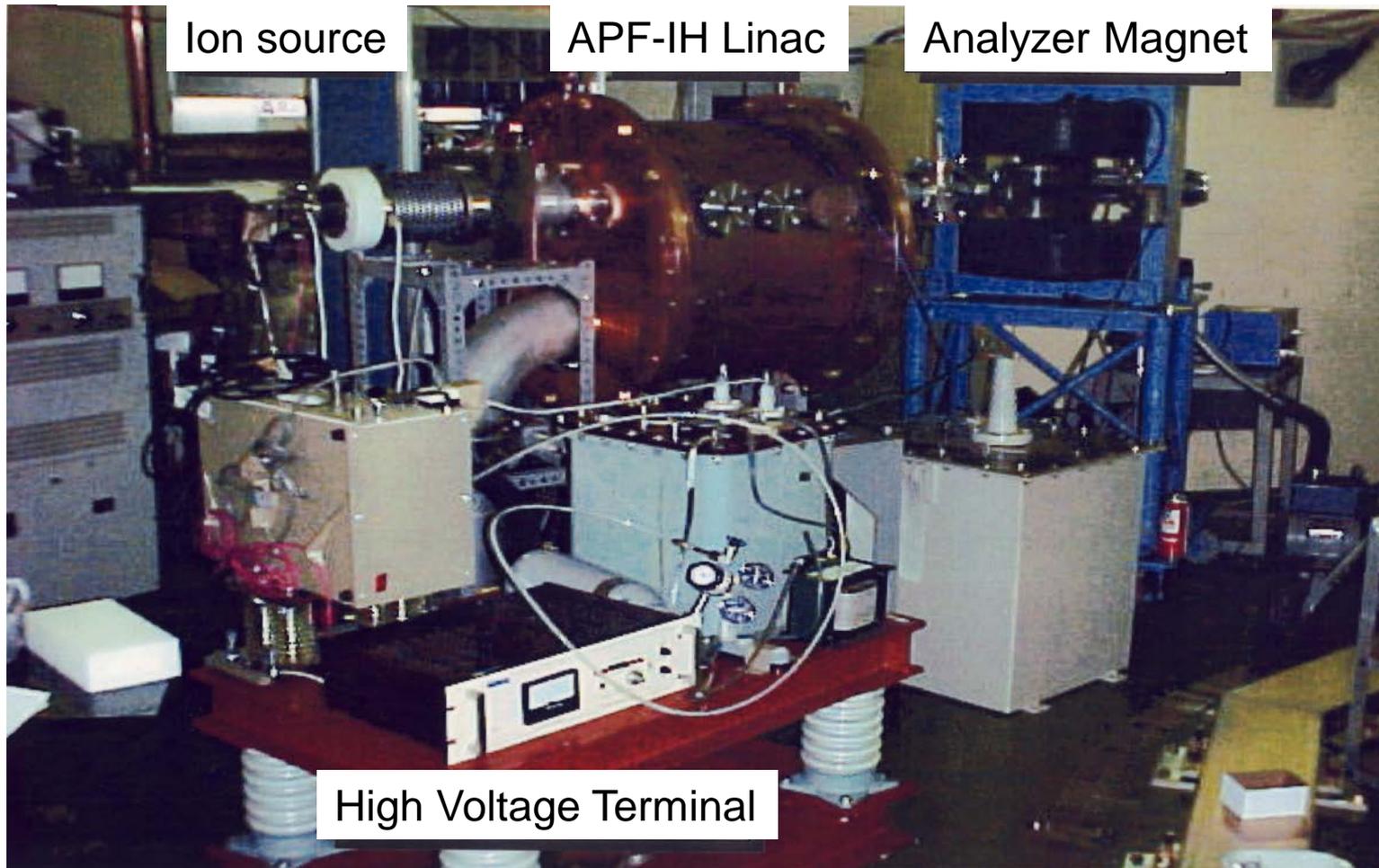
① ECR Ion Source

This type of ion source produces highly charged ions.

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

13.(1999) POP of APF-IH Linac for heavy ion, 10 to 90keV/u

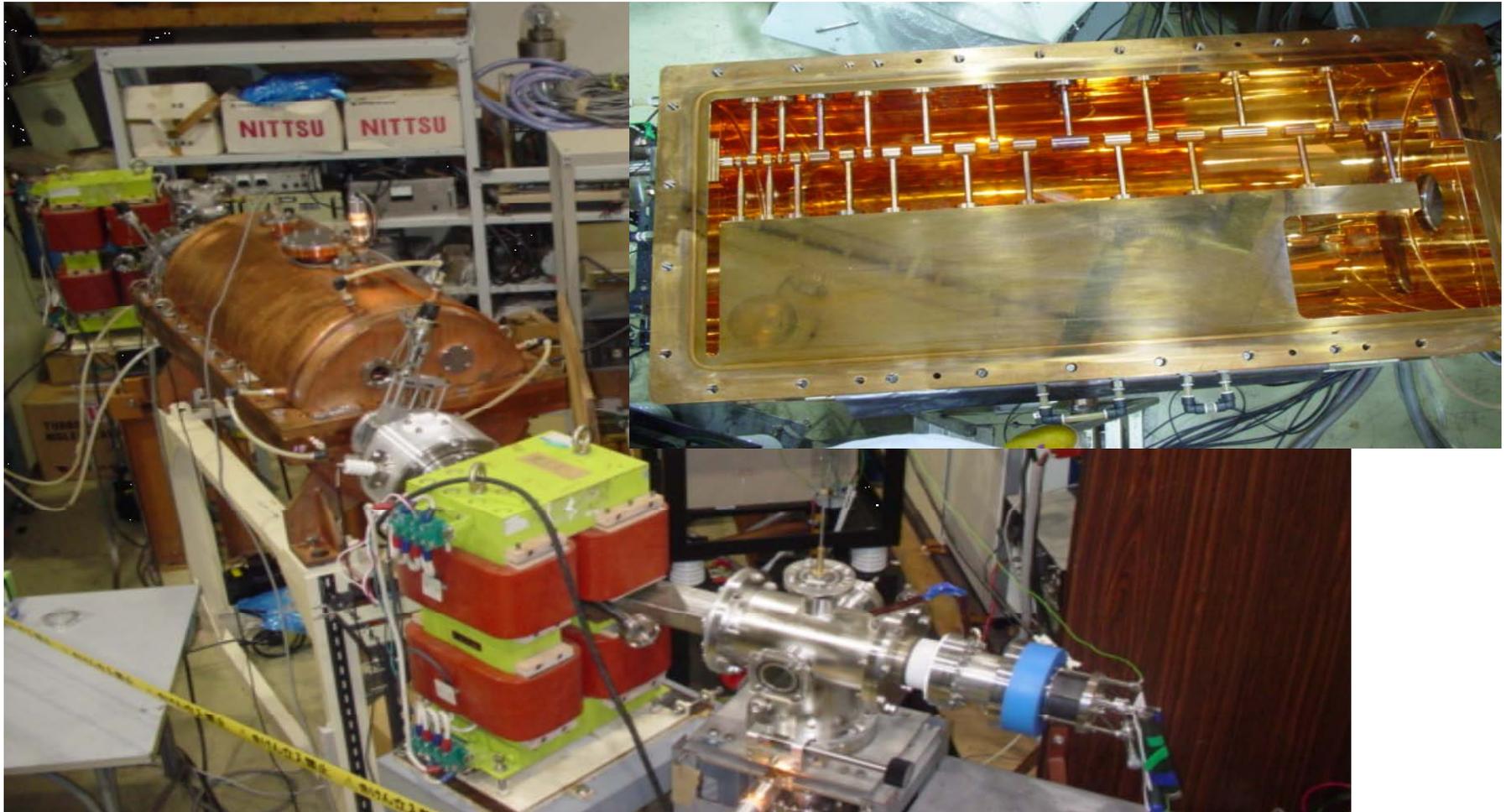
Acceleration Stand of POP APF-IH Linac



1999 APF-IH type Linac POP Accelerator APF focus, 10-90keV/u Acc Matui, Yamamoto

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

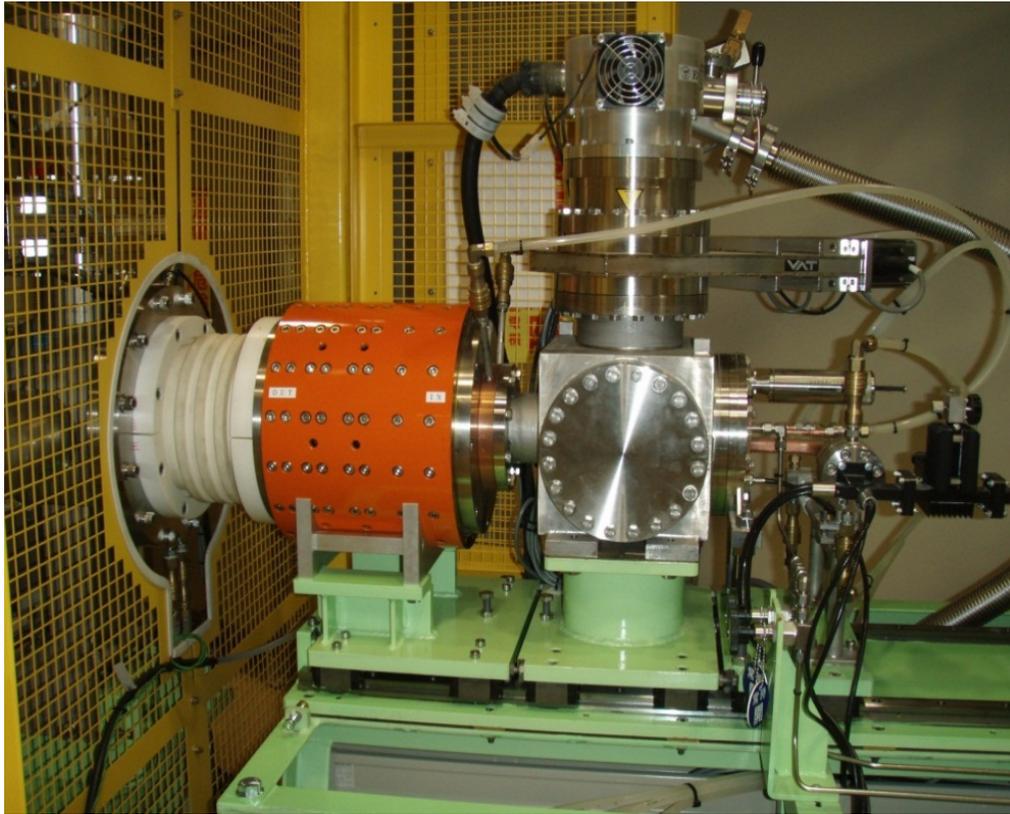
APF-IH type Linac of C^{4+} Acceleration for Cancer Therapy



21.(2004)APF-IH Linac for Cancer Therapy of C^{4+} , 60keV/u to 2MeV/u,

Yamamoto

Kei series PM-ECR ion source



Kei2 source KeiGM

Magnetic field production
All permanent magnet

Microwave

Frequency 9.75-10.25 GHz

Operation mode pulse

Extraction voltage 30 kV@C⁴⁺

HIMAC, Gunma U., Saga pref. Kanagawa pref. Operation 2010

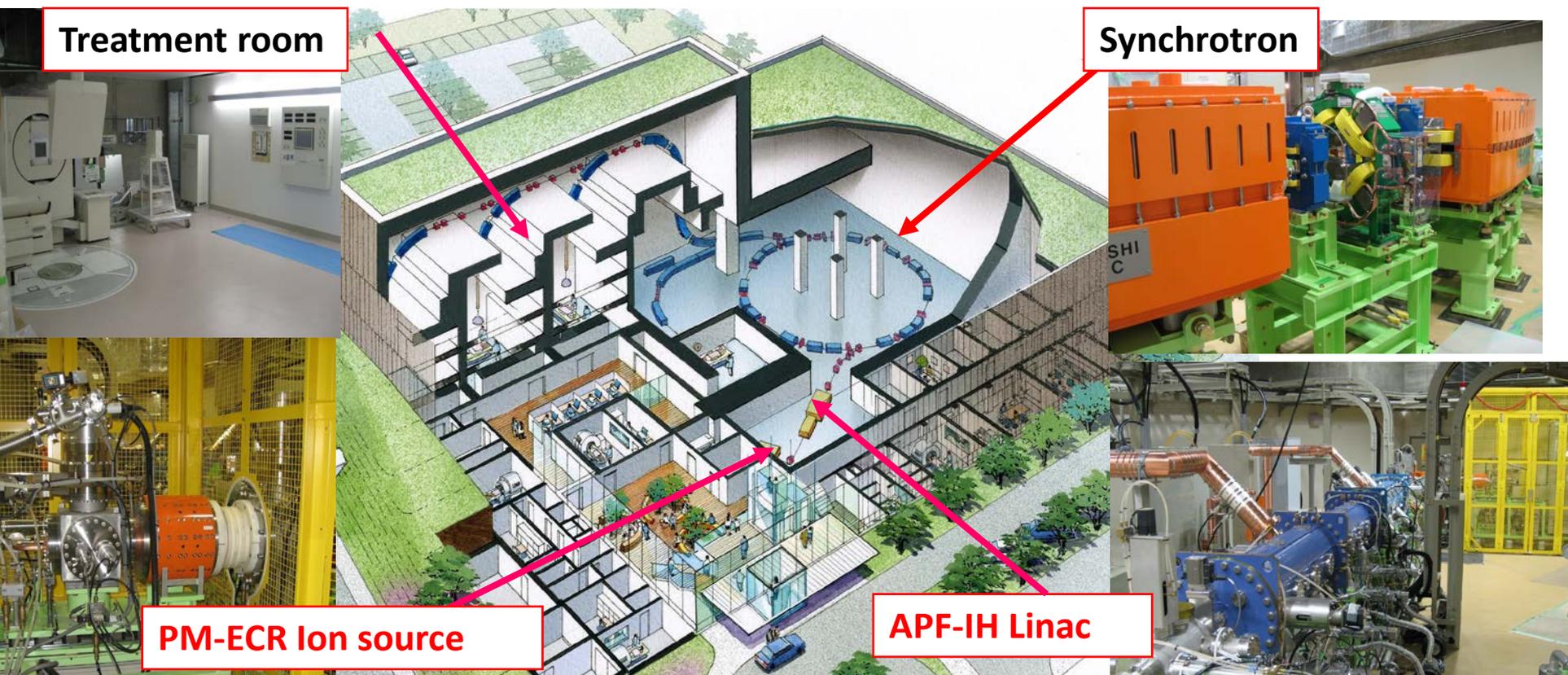
(2001-2005) PM type ECR ion source for Carbon cancer therapy,

Design, Const., Operation Muramatu

Gunma University Heavy ion Medical Center in Japan

Compact Synchrotron Facility for Carbon 400MeV/u Operation 2011

Requirement for carbon ion radiotherapy
(Range 25cm, Field size 15cm, 5GyE/min. Irradiation port H&V)



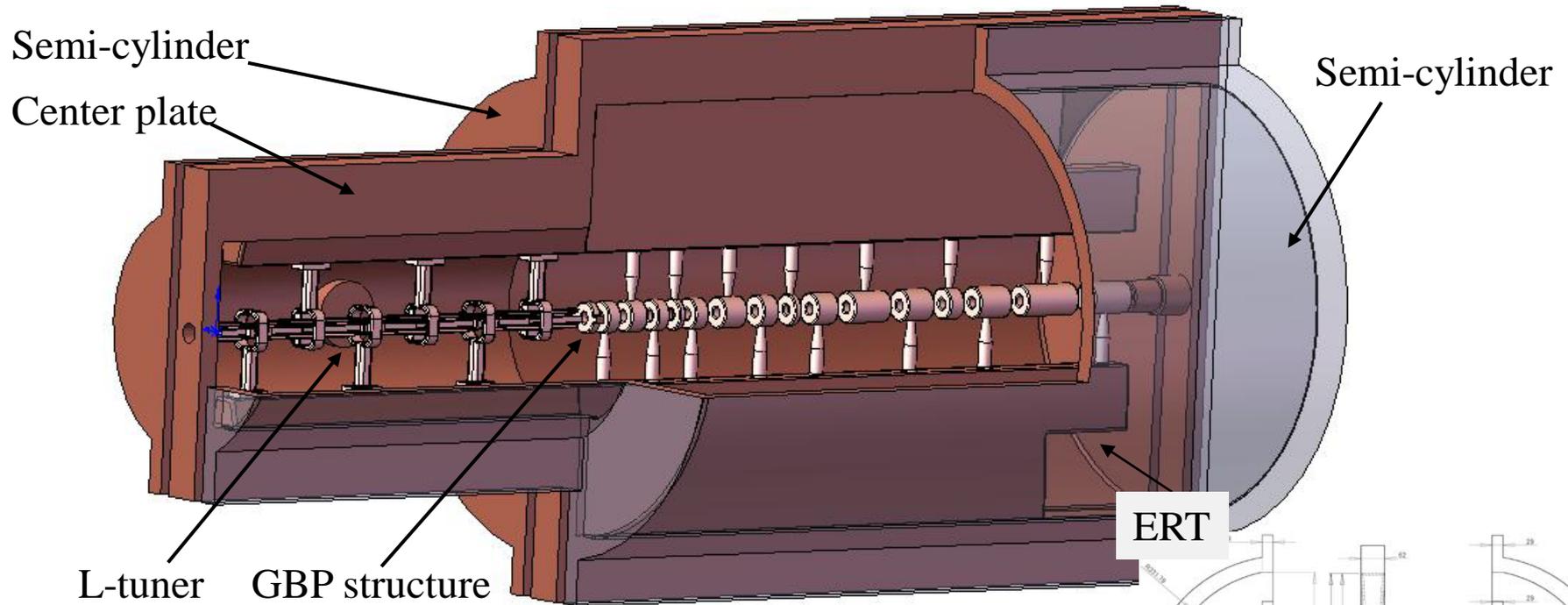
- 21.(2004) APF-IH Linac for Cancer Therapy of C4+, 60keV to 2MeV, Design, Const., Acc
- 221(2005)PM type ECR ion source for Carbon cancer therapy, Design, Const., Operation

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

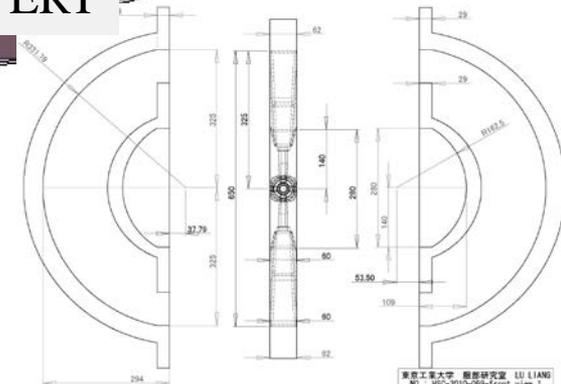
がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器

(2009-2010) HSC parameter: final design based on cavity simulation Lu

Image of 6mA HSC linac final design & sandwich type fabrication



The final design which inner linac is 1800mm include ERT-tuner, L-tuner, GBP structure and 65mm EXITFF discussed before.



服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器

6mA HSC parameter: final parameters

Main Parameter		
Coordinate	RFQ	GBP+DT
Frequency (MHz)		100
Particle		C ⁶⁺
Total inner length (mm)		1800
Power (kW)		94kW
Q value (MW-S)		14486
Max. field (Kilpat.)		1.8
Cell Numbers	41	1+16
Synchrotron phase	-90,-30	0,-60,-30,30,30...
W _{in} (KeV/u)	25	220
W _{out} (KeV/u)	220	2MeV
Input beam current (mA)	20	13.1
Output beam current	13.1	3.88(Gau-dis: 5.98)
Diameter (mm)	280	650
Length (mm)	679.58	1120.42

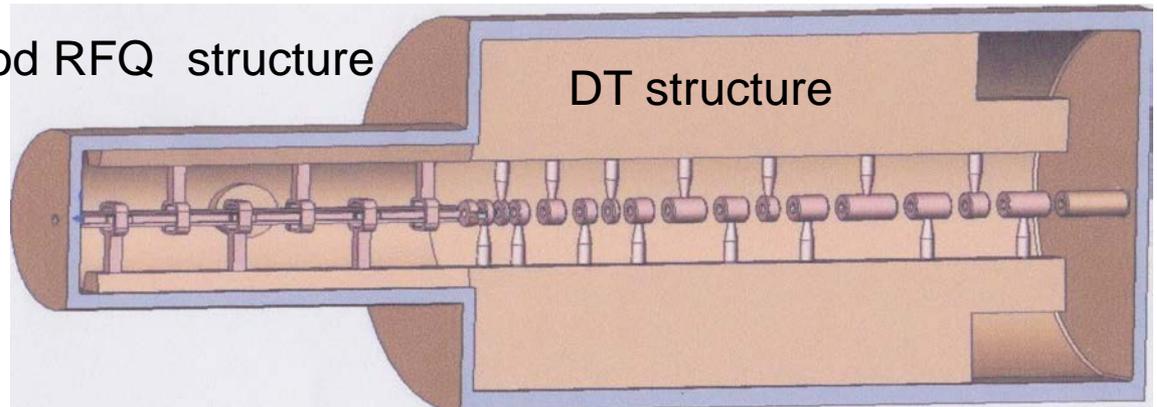
服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器 Structure of POP Accelerator of Hybrid Single Cavity (HSC) Linac by DPIS with LIS

RFQ and DT structure (Hybrid) in IH type Single Cavity (HSC) Linac
by Direct Plasma Injection Scheme (DPIS) with Laser ion source (LIS)

4 rod RFQ structure

DT structure



服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器

高周波特性実験の結果とまとめ：まとめとシャントインピーダンス

周波数	Q値	パワー	空洞の 電場分布	電場の マッチング	チューニング 効果
100.53 MHz	95%	99 kW	良く一致している	集中電場無し	10mmの挿入 が必要

シャントインピーダンス:

$$Z_s = V^2 / PL \quad V: \text{acceleration voltage} \quad P: \text{power} \quad L: \text{cavity length}$$

シミュレーション値:

$$Z_{C^{6+}} = \frac{[(24 - 0.3) \times 10^6 / 6 / \cos 30^\circ / TTF]^2}{94 \times 10^3 \times 1.8} = 123.0 \text{ (M}\Omega / \text{m)}$$

PoP 実証機による計算値: $Z_{HSC} = 123 \times 0.95 = 116.8 \text{ (M}\Omega / \text{m)}$

摂動法による計算値: $Z_{HSC} = \frac{1}{2\pi r^3 \epsilon_0 \omega L_t} \left(\int_0^{L_t} \sqrt{\Delta} \alpha dz \right) = 115.4 \text{ (M}\Omega / \text{m)}$

これまでの加速実験

$$Z_{HSC} = C \beta^{-2} D^3 f^{3.5}$$

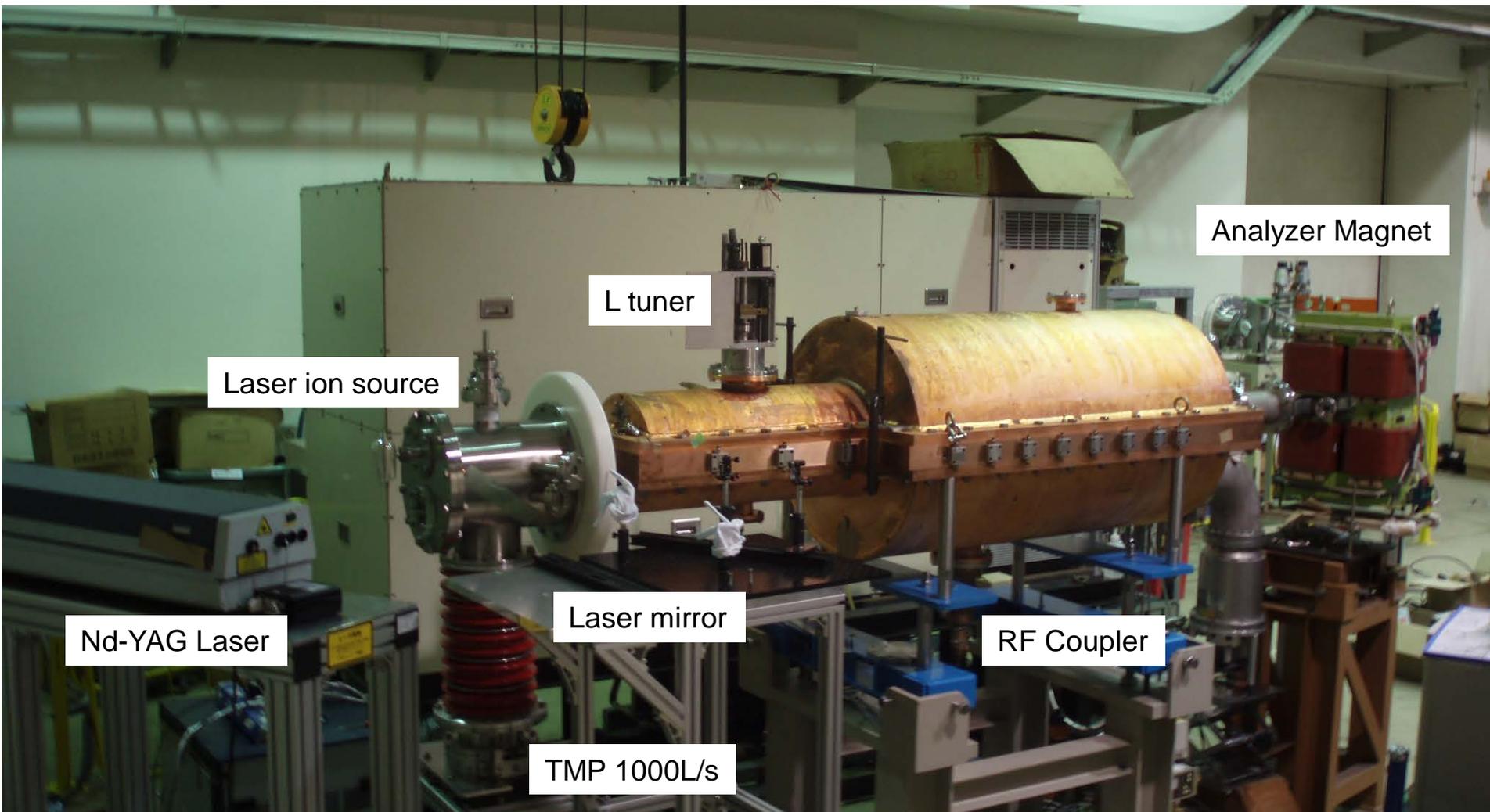
データーの経験からの計算値:

$$= 1.7 \times 0.04658^{-2} \times 0.51^3 \times 100^{3.5} \times 10^7 = 110.0 \text{ (M}\Omega / \text{m)}$$

服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器

Acceleration Test Stand of Hybrid in IH type Single Cavity (HSC) Linac

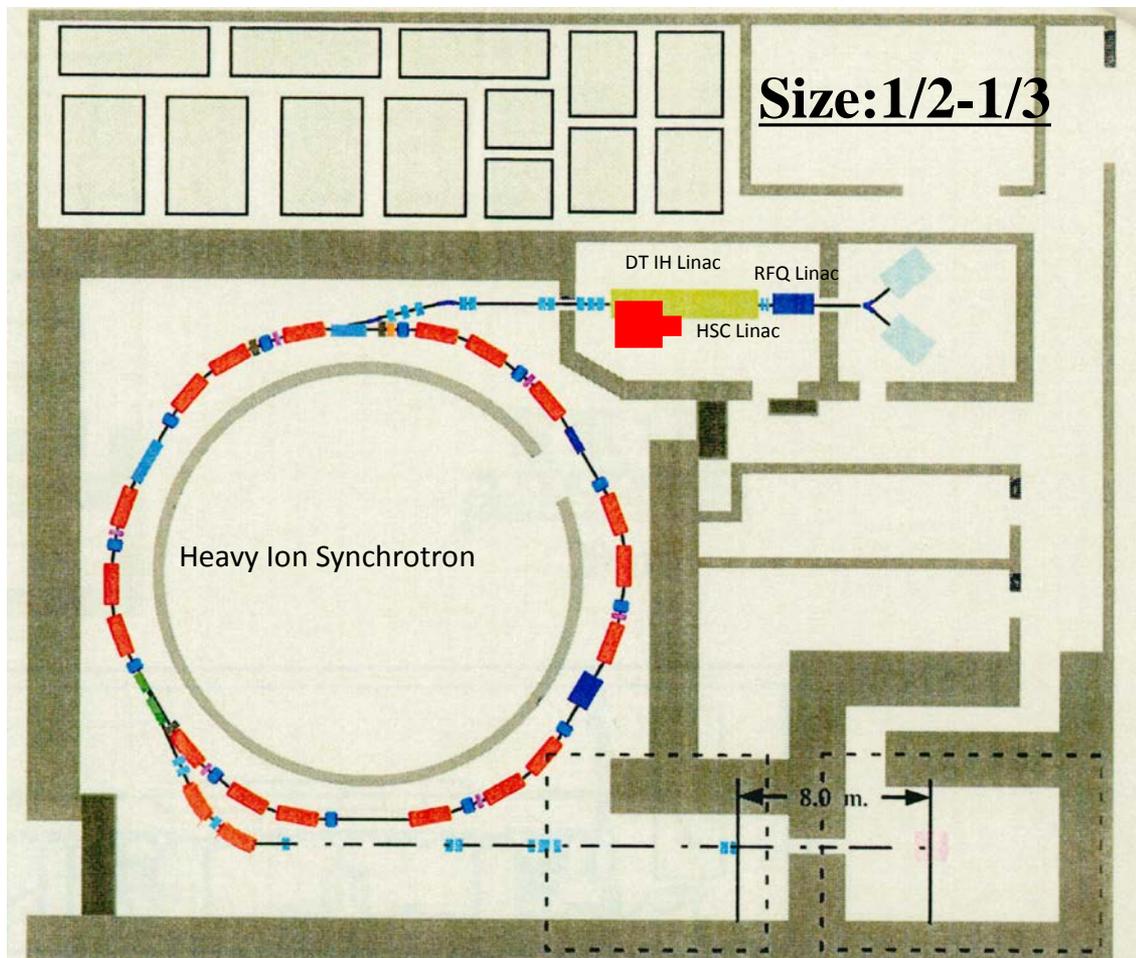


服部の重イオンがん治療加速器の開発研究

がん治療用の直接プラズマ入射法(DPIS)を用い炭素6価加速複合単空洞IH型入射線形加速器

Compact type heavy ion cancer therapy

Injected HSC type Linear Accelerator in Small type Carbon Cancer Therapy



24.(2010)POP of Hybrid Single Cavity(RFQ+DT) Linac for C cancer therapy, 0.05 to 24MeV

3.医療応用粒子線加速器の開発研究及び事業

A.普及型重粒子線がん治療加速器のさらなる開発研究

A-1.重粒子線がん治療用炭素6価DPIS法加速小型線形加速器の開発研究

B.新型・小型重粒子線がん治療加速器の開発研究

C.未来型超小型重粒子線がん治療加速器の開発研究

C-1. ECR-IPAC重粒子線加速器の開発研究

D.ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)加速器システムの開発研究

E.既存及び全く新しい同位体製造に関する大強度加速器及び応用装置開発研究

E-1.大強度軽イオン中エネルギー粒子線利用(陽子、重陽子、3重陽子、 ^3He 、 ^4He ,...)

E-2.全く新しい方法による(大強度粒子線によるプロジェクトイル・フラグメンテーション)
有効同位体元素の製造

4.大強度粒子線加速器研究と応用研究及び事業

A.大強度軽粒子線応用

A-1低エネルギー陽子線利用

半導体ウエハー用陽子ナノカッター法

B.大強度軽粒子線により発生する中性子の利用

B-1高性能半導体シリコン基盤の製造に低エネルギー中性子の利用

B-2中性子による有効同位元素の製造

C.大強度重粒子線応用

C-1低エネルギー重粒子線利用(パルス、CW駆動応用加速器)

超高エネルギー重イオン注入器による半導体への注入

3.医療応用粒子線加速器の開発研究及び事業

D.ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)加速器システムの開発研究

D.ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)

ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)はガン細胞に吸収されやすいホウ素(B)化合物薬剤を人体に投与後、中性子を照射して、 ^{10}B の中性子反応により発生した α 線(He)とLiイオンがガン細胞を破壊する治療法である。図-1にBNCTの模式図をしめす。

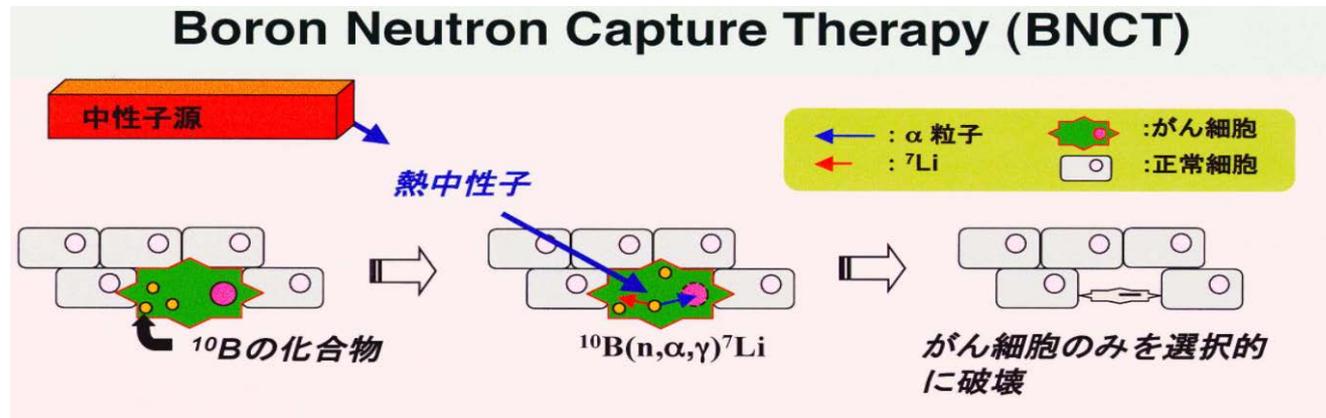


図-1にBNCTの模式図

がん治療としては重イオンビームを使う場合と同じであるが、BNCT法では発生したイオンの生体内での飛程が5~10 μm である。これは細胞の大きさのオーダーであり**ガン細胞のみを選択的に破壊することができ、理想的治療法と言える。**

そこで、加速器を利用して低中エネルギーで10mA以上の陽子を発生すれば、Li、BeターゲットでBNCT治療可能な中性子を生成することができる。

小型、省電力型線形加速器により都市型病院に設置可能である。

3.医療応用粒子線加速器の開発研究及び事業

E.既存及び全く新しい同位体製造に関する大強度加速器及応用装置開発研究

E-1軽イオン中エネルギービーム利用(陽子、重陽子、3重陽子、 3He 、 4He ,...)

現在使用されている放射性同位元素だけを簡単に列挙すれば、以下のものである。

PET利用放射性同位元素： ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F

利用頻度の多い非密封放射性同位元素： ^3H 、 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{85}Kr 、 ^{99}Mo 、 ^{125}I

利用頻度の多い密封放射性同位元素： ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{137}Cs 、 ^{169}Yb 、 ^{192}Ir 、 ^{198}Au 、 ^{241}Am

大強度イオンビーム(現在の1000-10000倍以上)を使用して効率よく製造すれば世界で初めて有効な新同位体元素を人類が利用できる。

陽子(p)核反応(p,n),(p,2n),(p,3n),(p,4n),(p,d),(p,t),(p,3He),(p,He)等

重陽子(d)核反応(d,n),(d,2n),(d,3n),(d,4n),(d,p),(d,t),(d,3He),(d,He)等

3重陽子(t)核反応(t,n),(t,2n),(t,3n),(t,4n),(t,p),(t,d),(t,3He),(t,He)等

3He 核反応(3He ,n),(3He ,2n),(3He ,3n),(3He ,4n),(3He ,p),(3He ,d),(3He ,t),(3He ,He))等

4He 核反応(He,n),(He,2n),(He,3n),(He,4n),(He,p),(He,d),(He,t),(He,3He))等である。

E-2. 全く新しい有効同位体元素の製造

中エネルギー重イオンビームによるプロジェクトイル及びターゲット・フラグメント核種の製造

これまで核物理基礎研究で発見された有効同位体元素、各国で、重イオンによるプロジェクトイルフラグメンテーション核種による稀少同位体核種の研究が行なわれている。

それらの研究で見いだされた有効同位体元素は照射電流が微弱であるため実際に

人類が利用することができない。**大強度重イオンビームを使用して製造すれば世界で**

初めての有効な新同位体元素を人類が利用できることになる。ちなみに現在医療で利用され

ているPET用放射性同位元素： ^{10}C 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 等は1000倍以上の効率で即事業化可能である。

4.大強度粒子線加速器研究と応用研究及び事業

A.大強度軽イオンビーム応用

A-1低エネルギー陽子ビーム利用

半導体ウエハー用陽子ナノカッター法

陽子ビームナノカッターは陽子ビームをシリコン基板に注入するだけで、陽子のストップ位置に水素のバブル及びエネルギー注入によりカットすることができ、**ナノメートル以下の凸凹しかない表面(結晶原子単位でフラット)が実現するためウエハーの研磨を必要としない究極の平面が製造される。**半導体、シリコン産業で陽子ビームナノカッターは利用されることになり、その省エネルギー、省資源の量は計り知れないものになるであろう。さらに半導体チップが薄くなることで、今まで考えられ無かった曲面の冷却基板に接着できることで、**曲面の回路基板を製作できることになる。そのため円柱や球面形の回路を製作することが可能となる。**この半導体基板回路にコペルニックスの転回を生み、回路設計上に革命をもたらすはずである。電子工学に立体回路網の新しい方式が生まれるであろう。

B.大強度軽イオンビームにより発生する中性子の利用

B-1高性能半導体シリコン基盤の製造に低エネルギー中性子の利用

低エネルギー中性子をシリコン(Si)ウエハー中に入射してSi中に3.1%存在する ^{30}Si と $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si}$ \rightarrow $^{31}\text{P}+e$ 反応を起こさせて ^{31}P をSiウエハー中に均一に、さらにPの濃度を制御したSiウエハーが超高性能半導体用として使われている。現在は原子炉からの中性子照射で製造している。これはBNCTが現在原子炉の中性子を利用して治療されているのと同じ事情である。

10年後にはその需要は倍増すると言われており原子炉に変わる新しい中性子源が必要である。10～100mAの中、低エネルギー大強度陽子、重陽子ビームを中性子ターゲットに照射し、中性子を発生させる。

B-2中性子による有効同位元素の製造

4.大強度粒子線加速器研究と応用研究及び事業

C.大強度重イオンビーム応用

C-1低エネルギー重イオン利用(パルス、CW駆動応用加速器)

超高エネルギー重イオン注入器による半導体への注入

低中エネルギー大強度イオンビームの半導体への利用)

半導体産業界で言う高エネルギー重イオン注入器でCCD半導体によるビデオやデジタルカメラに革新が起こった。現在、高耐圧の必要なIGBTなどのパワートランジスタ基盤に深くホウ素注入ができる超高重イオン注入器が必要とされている。これは応用加速器分野で低エネルギー中強度応用加速器である。低、中エネルギー大強度重イオンビーム加速器となれば半導体産業に革命がもたらされるのも間近である。

C-2中エネルギー重イオン利用

重イオン慣性核融合とその基礎研究装置への利用

大強度イオンビーム加速の21世紀のブレークスルー(1台のRFQ-IH加速空洞で400mA以上のビームを低エネルギーから加速することが可能となった)が発見された。

重イオン慣性核融合(HIF)のドライバーとして最適であることを発見し、この方法を使用すれば、HIFの100万kW発電所で必要なPb+の400mAを1台の4ビームRFQ-IH型線形加速器1台で加速することが十分可能である。……………

大強度粒子線加速の背景

A. 大強度粒子線加速に対する21世紀の新ブレークスルー

中エネルギー大強度重粒子線応用

B. 重イオン慣性核融合とその基礎研究装置へ展開

大強度ビーム加速に対する21世紀のブレークスルー 重イオン慣性核融合基礎研究への新展開

服部俊幸

放射線医学総合研究所(東京工業大学)

目次

1. RFQ線形加速器による大強度加速の20世紀のブレークスルー
2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント
3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功
4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功
5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開
6. 大強度ビーム加速器研究と核融合基礎研究の問題点
7. まとめ

1. RFQ線形加速器による大強度加速の20世紀のブレークスルー

RFQ type linear Accelerator (Break-through of high intensity acceleration)

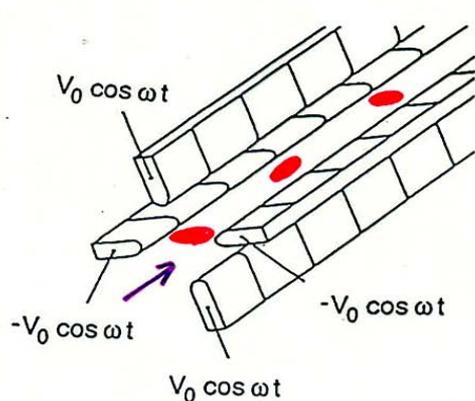
1975: ITEP: RFQ Design, Construction and Acceleration

Principle of RFQ proposed by Kaphinsky & Teplyakov

1980: LANL: POP 4 Vane RFQ Linac RFQ Design, Construction and Acceleration

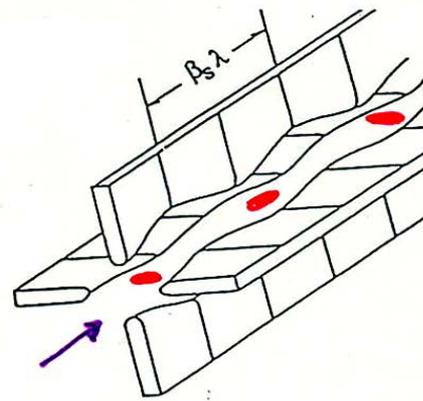
PARMTEQ soft produced by Jameson, Swenson...

Principle of RFQ Acceleration



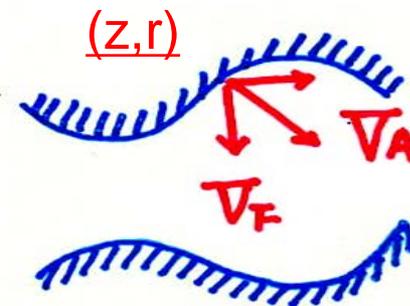
無変調電極

No modulation



変調電極

Modulation



V_A : Particle Acceleration

V_F : Particle Focusing

$$\vec{F} = qe(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

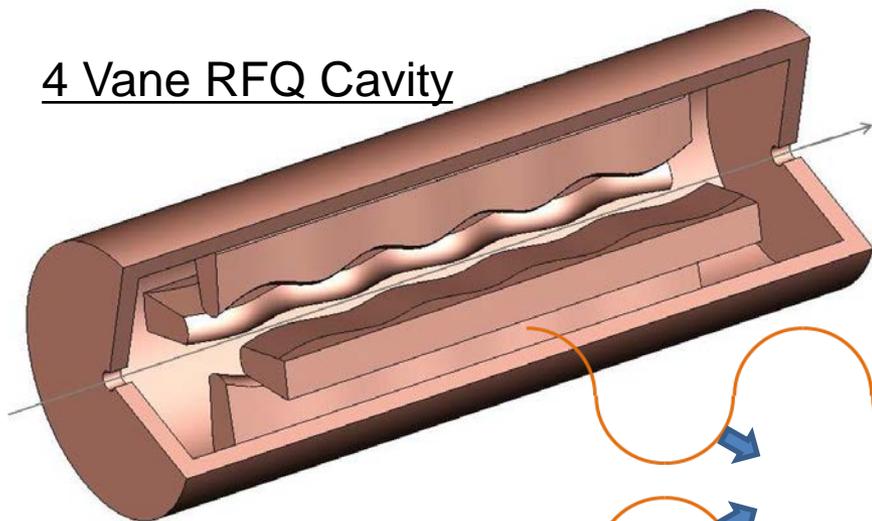


Electric(E) is higher than Magnetic(B) focusing at low energy (several 100 keV)

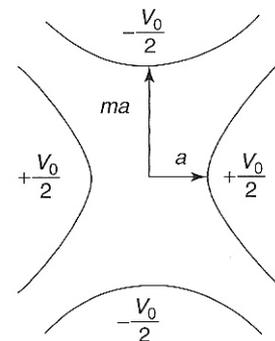
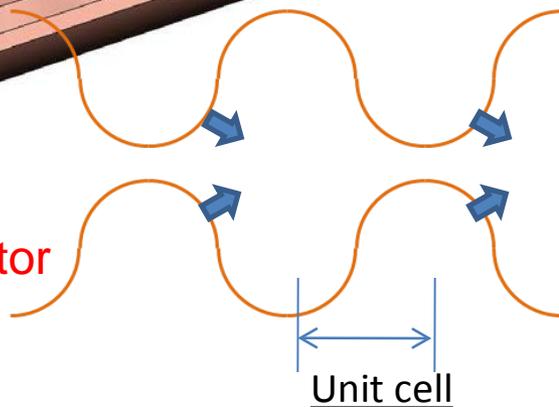
1. RFQ線形加速器による大強度加速の20世紀のブレークスルー

Principle of RFQ proposed by Kapchinsky & Tepolyakov (1969)

4 Vane RFQ Cavity



TE₂₁₀ like mode Resonator



Electric-quadrupole cross section

Two-term potential function

$$U(x, y, z, t) = \frac{V_0}{2} \left[\underbrace{\frac{X}{a^2} [x^2 - y^2]}_{\text{Focusing}} + \underbrace{AI_0(kr) \cos(kz)}_{\text{Acceleration}} \right] \sin(\omega t + \phi)$$

Focusing

Acceleration

1. RFQ線形加速器による大強度加速の20世紀のブレークスルー

20 Century Development

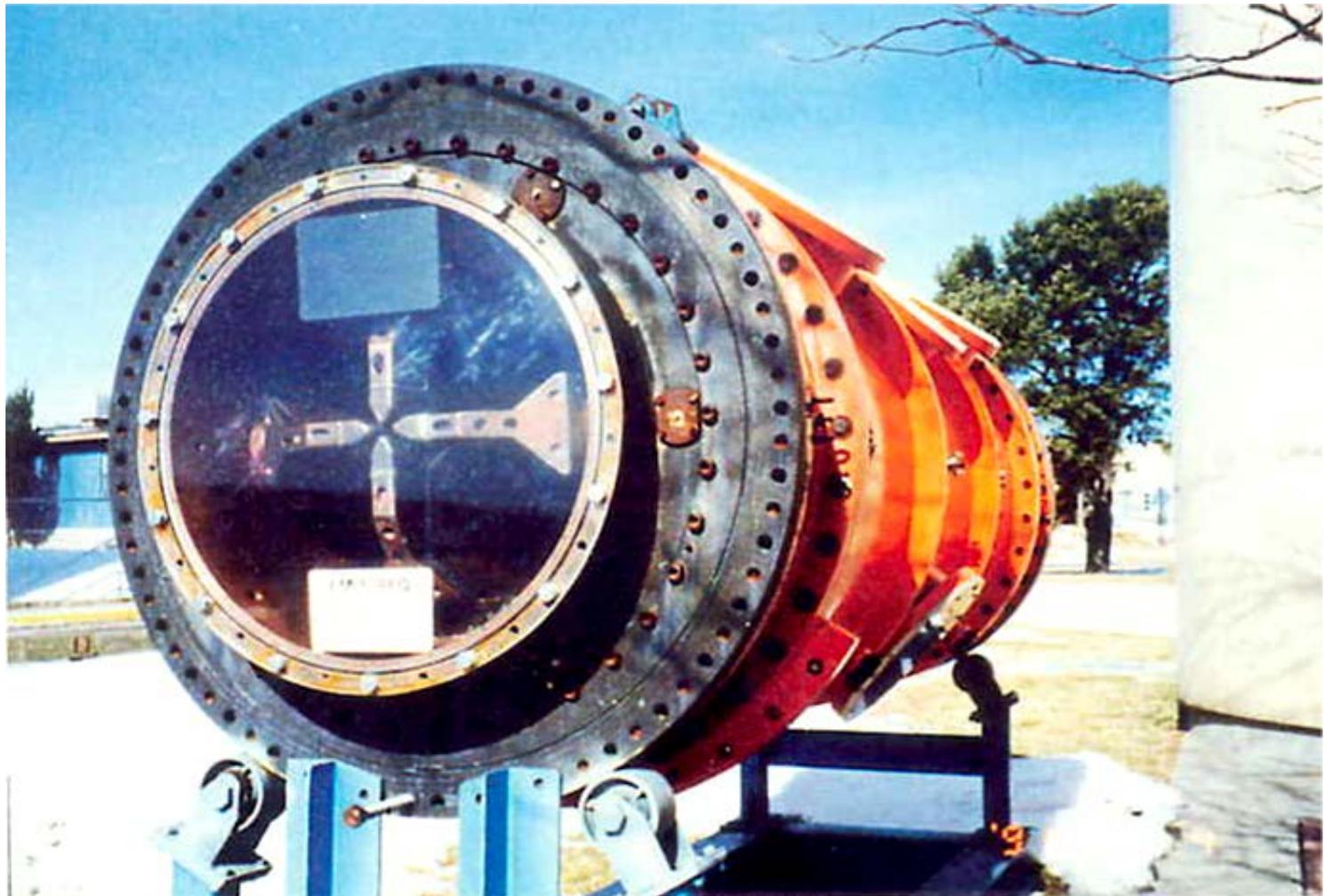
- * 1975 RFQ Linac Acceleration at ITEP
- * 1980 RFQ Linac 95% Accelerate at LANL
- * 1982 HI RFQ Linac Acceleration at INS

Break-through of 20 Century for high intensity acceleration

- * FMIT, IFMIF 21 Century construction
- * SNS (USA, Japan) 21 Century construction
- * Design of Heavy ion Inertial Fusion (HIF)

1. RFQ線形加速器による大強度加速の20世紀のブレークスルー

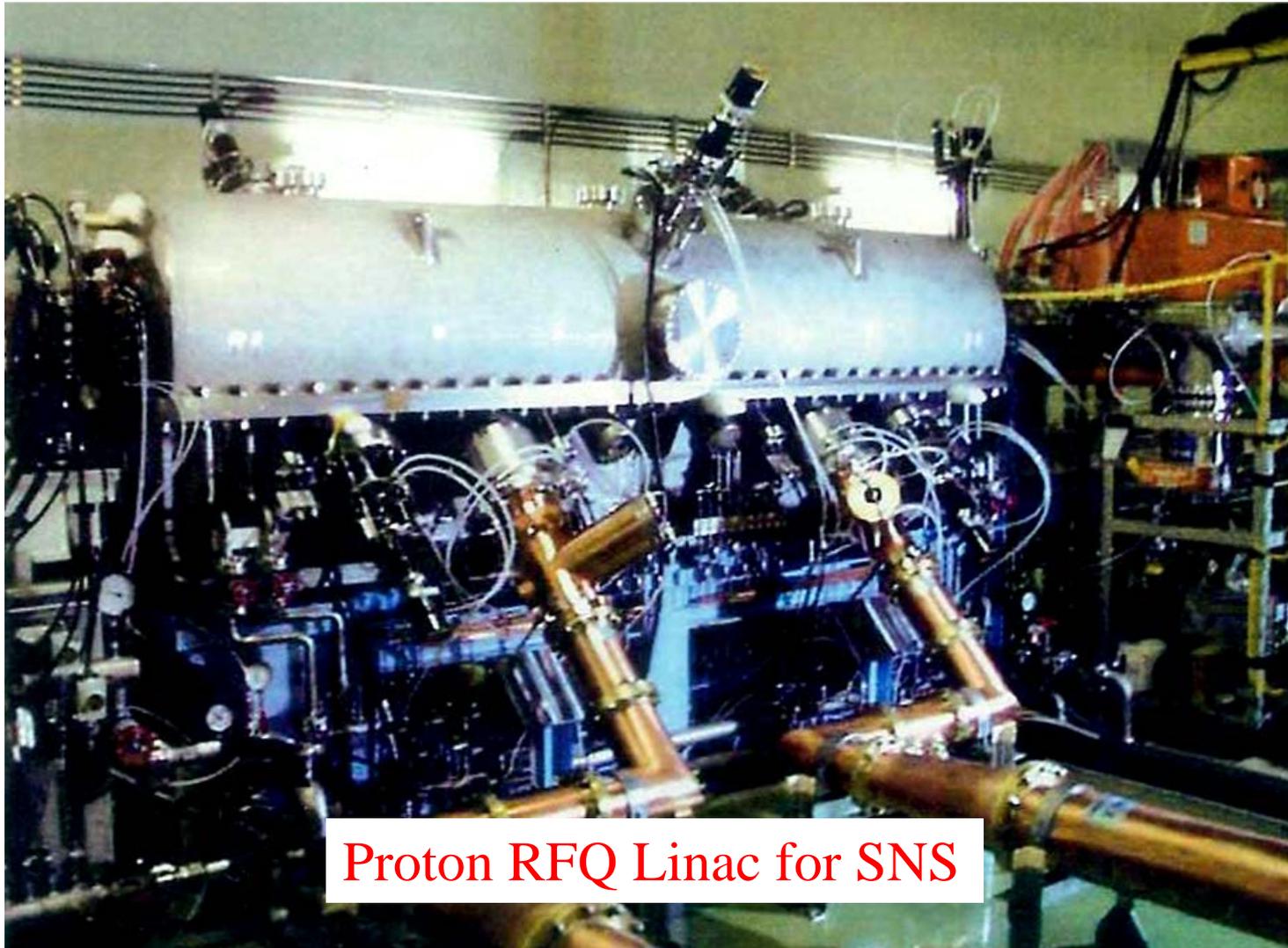
FMIT RFQ Linac at LANL(USA)



FMIT(D100mA) RFQ at LANL

1. RFQ線形加速器による大強度加速の20世紀のブレークスルー

SNS RFQ Linac at JAEA (J-PAC)



Proton RFQ Linac for SNS

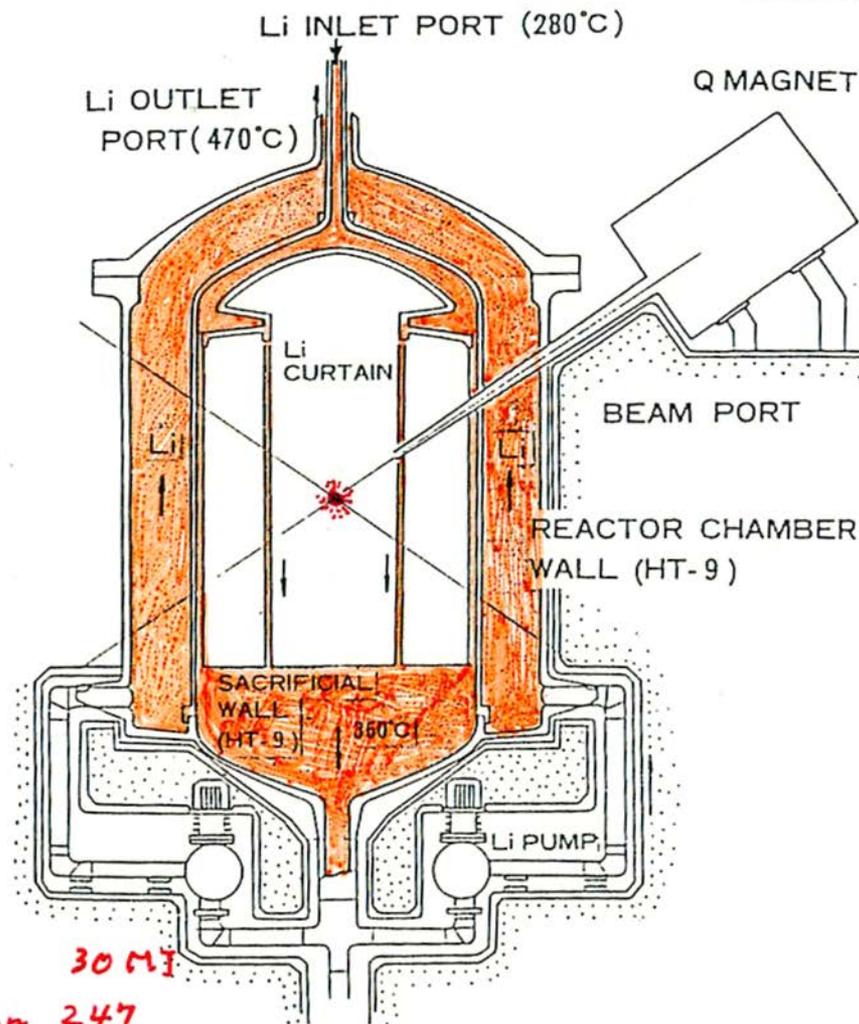
2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント

2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント

Heavy Ion Inertial Fusion (HIF)

Parameters of HIF(HIBLIC)

Particle	Pb (Bi)
Beam Energy	4 MJ
Target Gain	100
Output Energy	400 MJ
Beam Power	160 TW
Ion Energy	15 (10)GeV
Pulse Width	25 ns
Beam Current	10.7kA
Beam Size	3.2 mm
Repetition rate	10 Hz

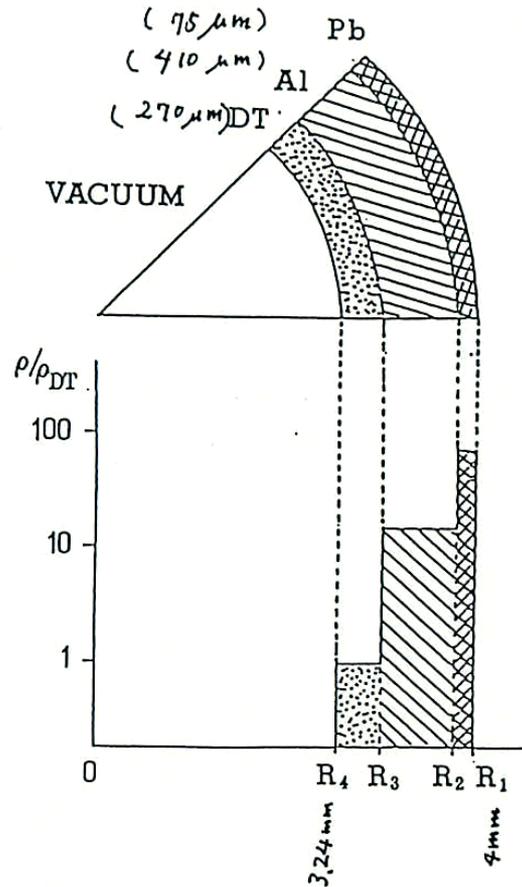


Particle 30 MJ
Neutron 247
X-ray 127
400 MJ

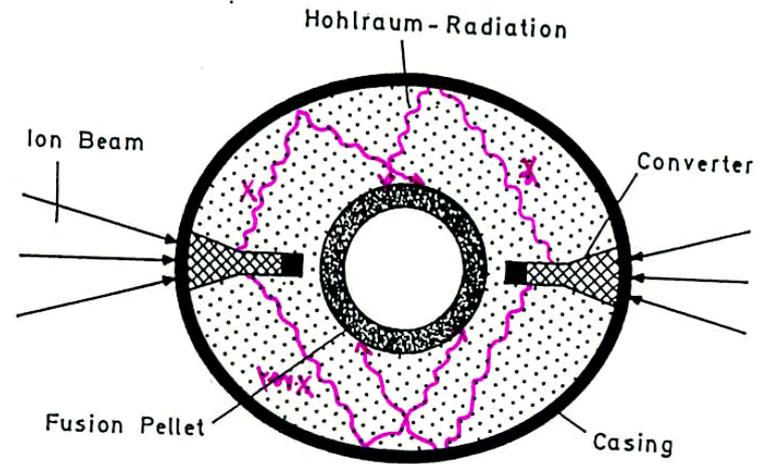
1 m

"HIBLIC-I" REACTOR CONFIGURATION

2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント



(A) ガス・パフ・ターゲット

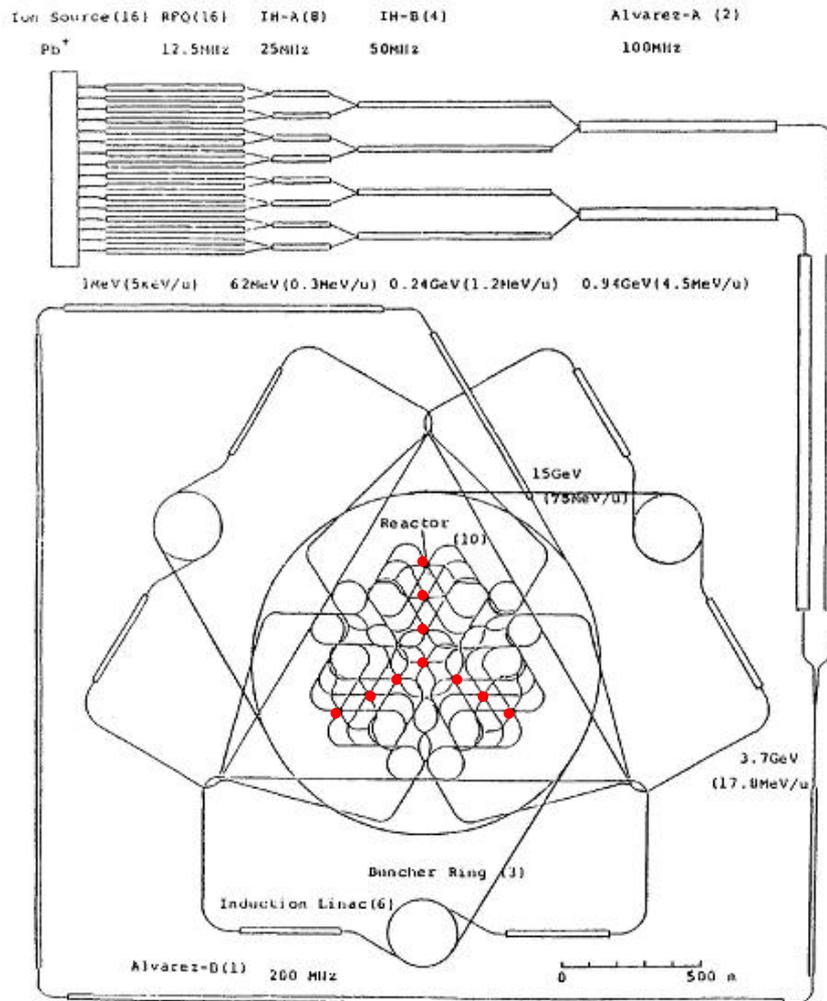


(B) インダクト・ドライブ・ターゲット

2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント

20世紀1980年代の重イオン慣性核融合

1GW Power Plant of HIF in 1984



History of HIF

20 Century

- 1975 RFQ Linac Acceleration at ITEP
- 1980 RFQ Linac 95% Accelerate at LANL
- 1982 HI RFQ Linac Acceleration at INS

Break-through

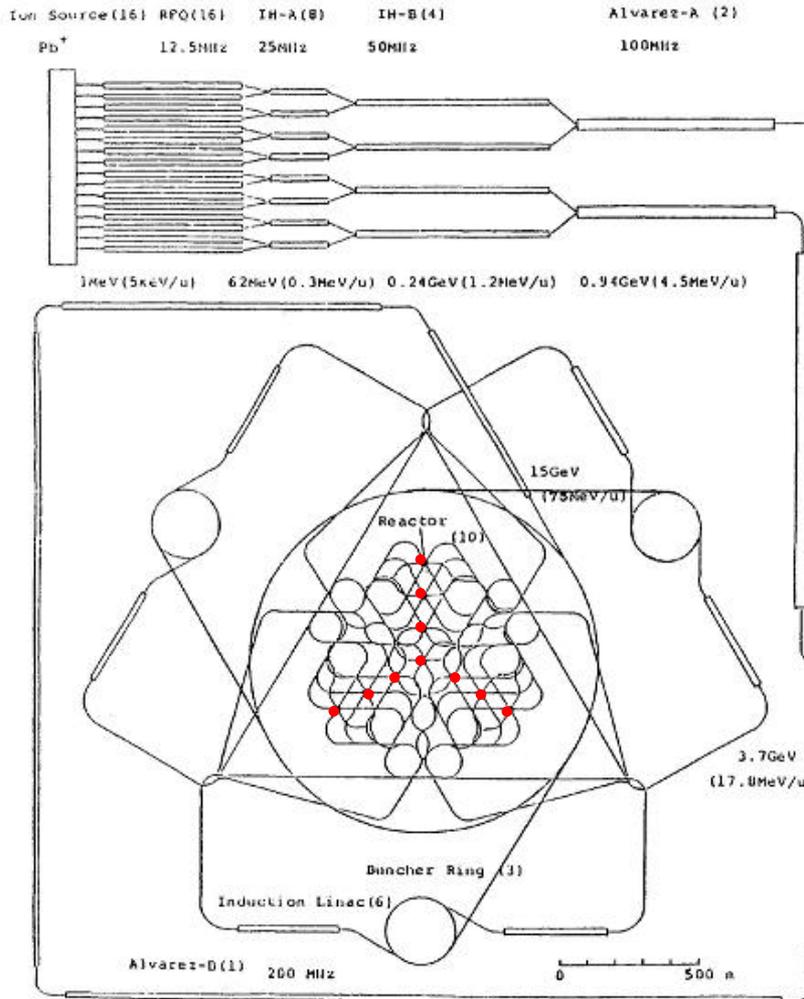
- 1980~1984 Designed Power Plant (1GW)
on HIF (Germany, Japan, USSR)
- RFQ 30mA x 16 sets = 480 mA (Pb⁺)

Layout of an inertial confinement fusion reactor plan named HIBLIC in Japan

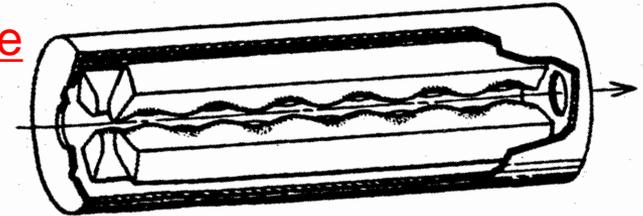
2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント

1GW Power Plant of HIF in 1984

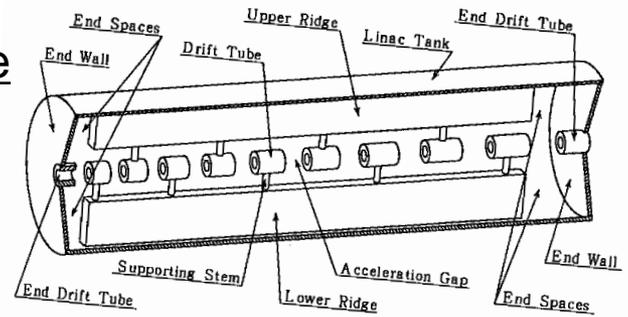
HIF driver Accelerator



RFQ type

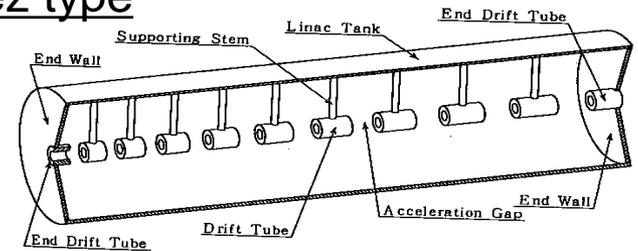


IH type



(b) Interdigital-H

Alvarez type



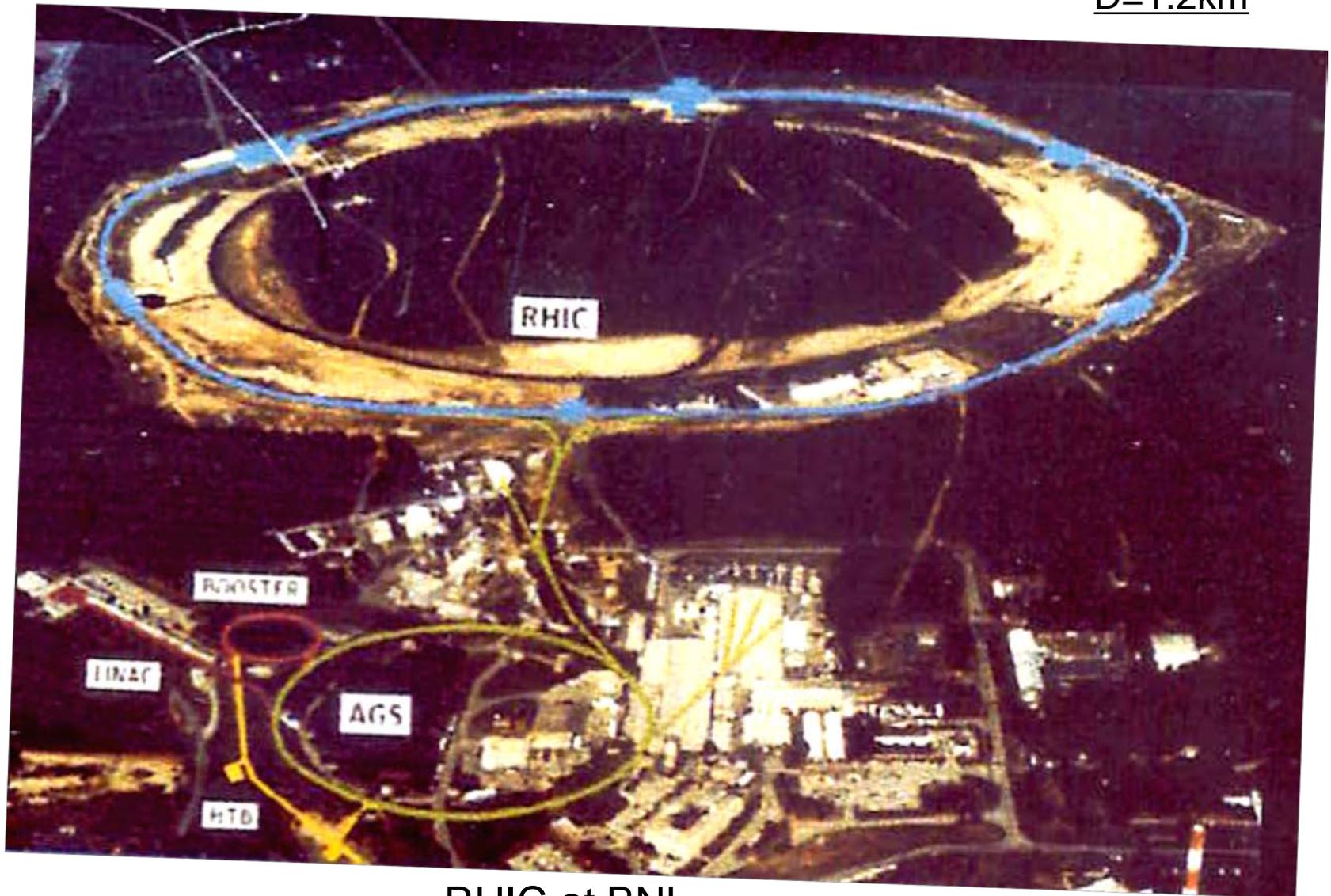
(c) Alvarez

Layout of an inertial confinement fusion reactor plan named HIBLIC in Japan

2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント

蓄積リング

D=1.2km



RHIC at BNL

2. 20世紀の重イオン慣性核融合発電プラント

重イオン慣性核融合RFドライバーの特徴

1. 100万kW発電所に2.5km四方が必要
(10万kW～1000万kWでほぼ同じ面積)
2. 大直径空洞(5m)の500mのRFQ線形加速器が16台
3. 複数台数の線形加速器全長は30kmに近い
(長大なRF線形加速器が問題)
4. 蓄積シンクロトロンはBNL研程度の大きさ問題無い

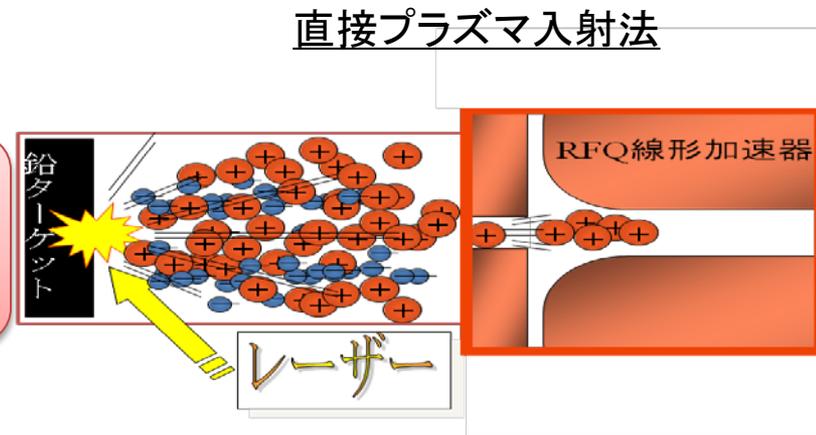
3. レーザイオン源を使用した 直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Direct Plasma Injection Scheme(DPIS): 直接プラズマ入射法

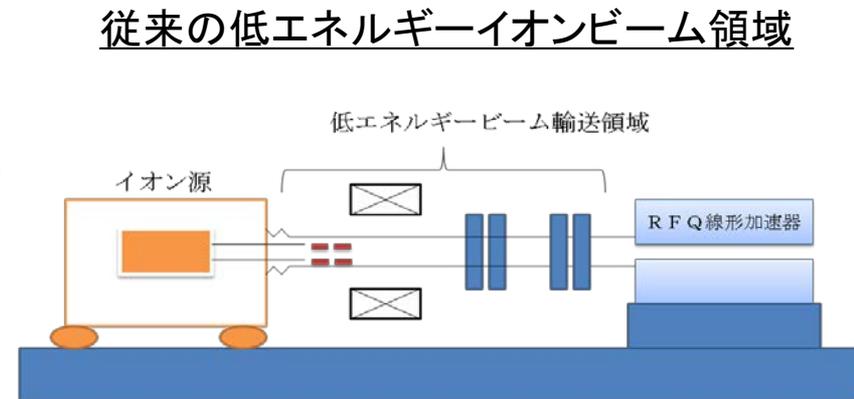
直接プラズマ入射法

レーザーイオン源で発生したアブレーションプラズマをRFQ線形加速器に直接入射することにより、100mA以上の大強度ビーム加速が可能



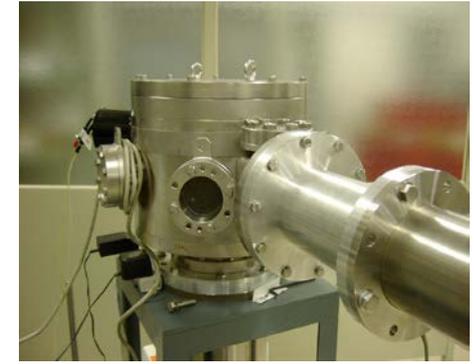
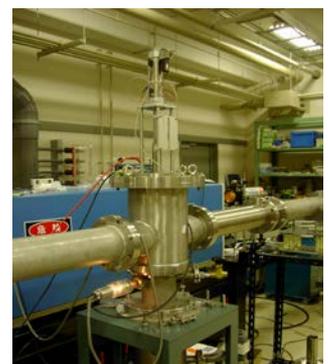
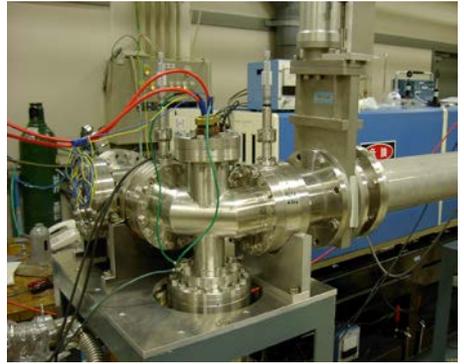
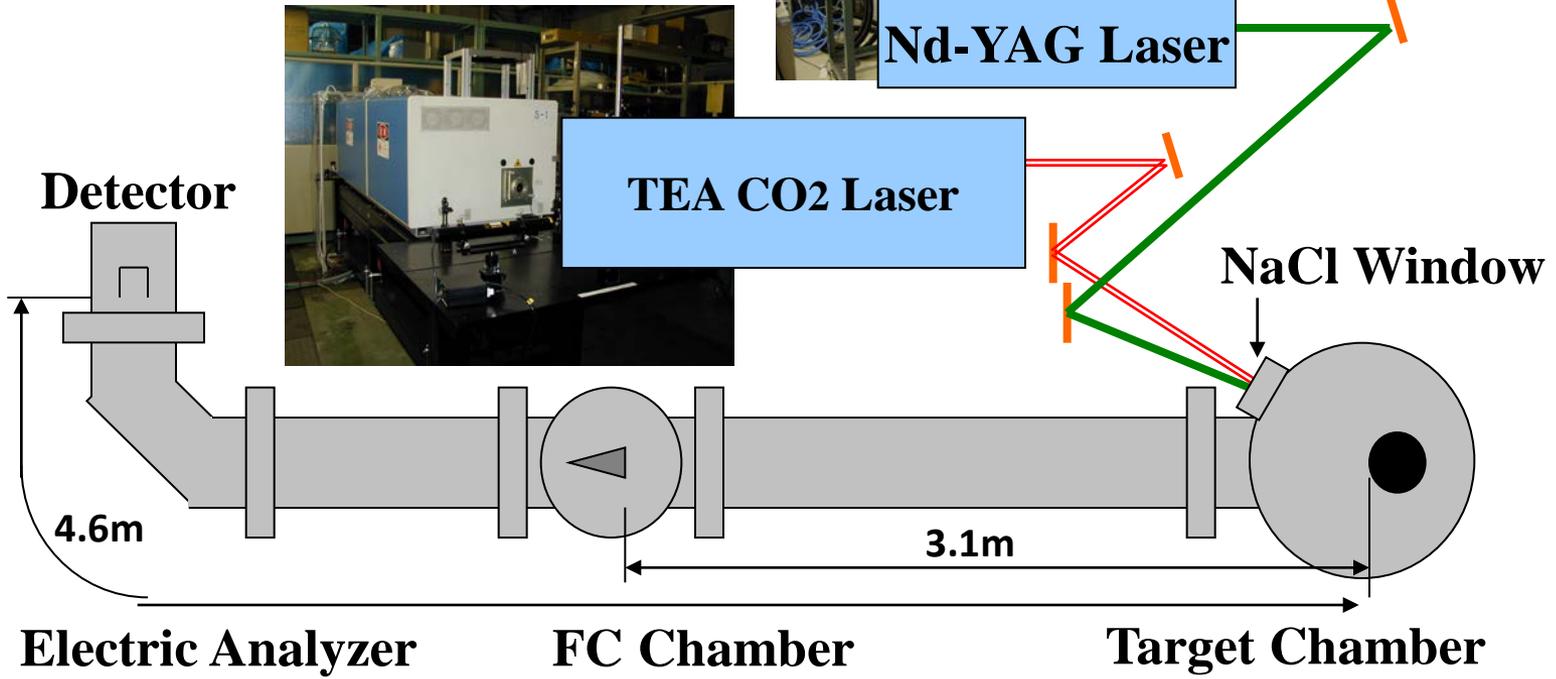
従来の加速方法

→イオン源が高電圧ターミナル上にあり、加速後イオンビームは磁場レンズや静電レンズなどで収束されたのち、RFQ線形加速器に入射・加速される



3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Measurement of charge states distributions of Laser ion source



3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

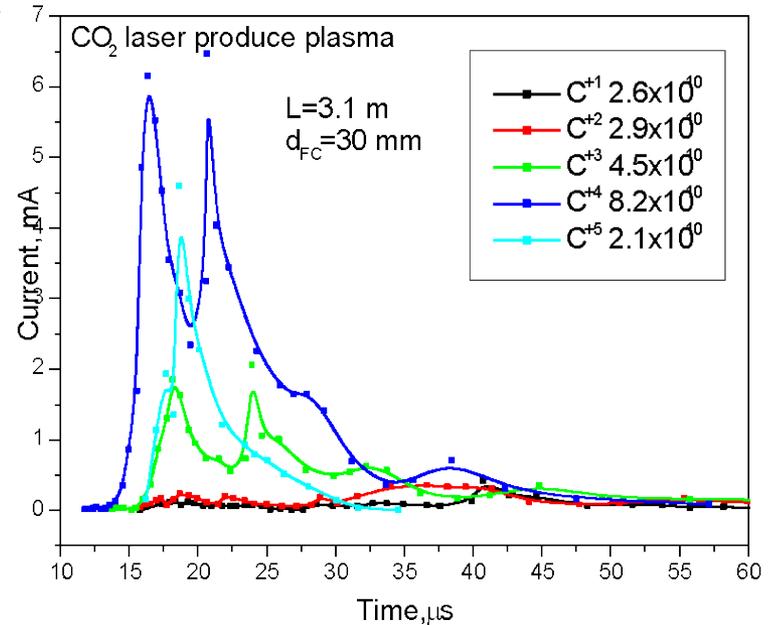
Result by analyzer

Current measured by analyzer is estimated by integrating (Signal from Analyzer)/ γ and current at F.C. and comparing

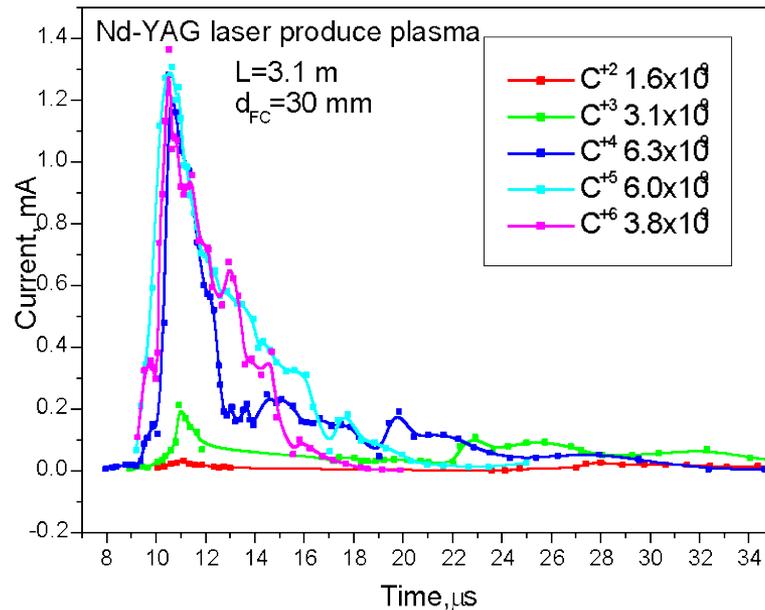
γ : secondary electron emission coefficient

More high charge state was produced by Nd-YAG than by CO₂
→ power density

Current of the different charge states

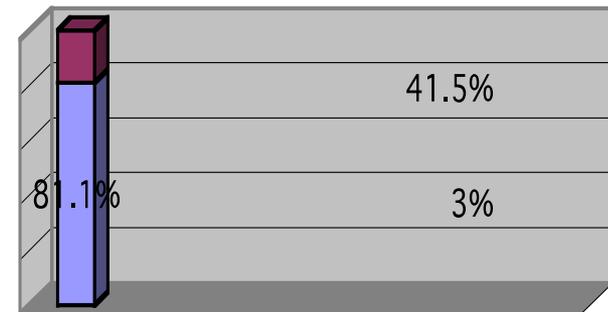
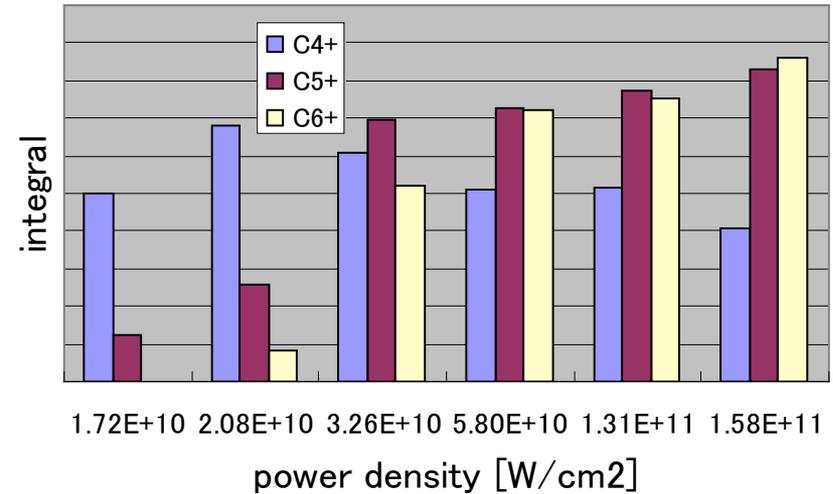
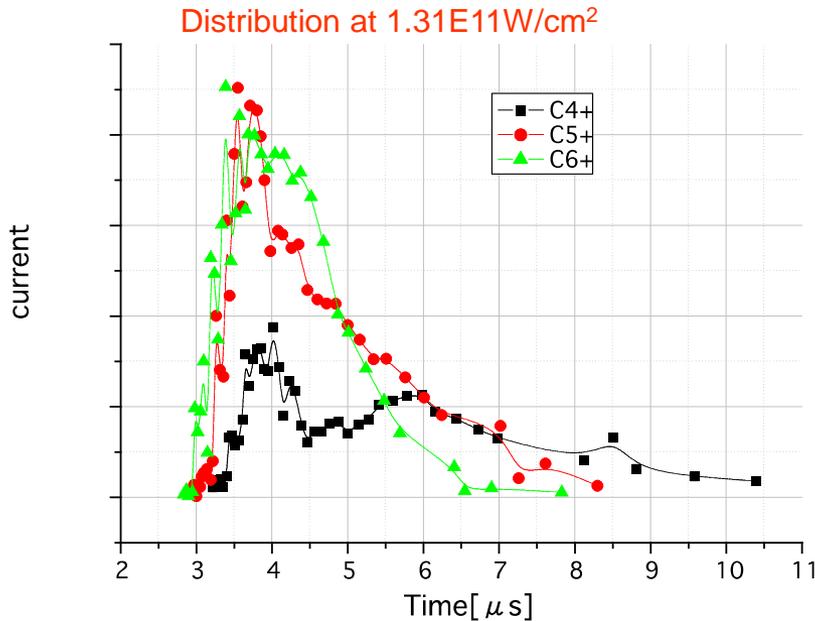


Current of the different charge states



3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

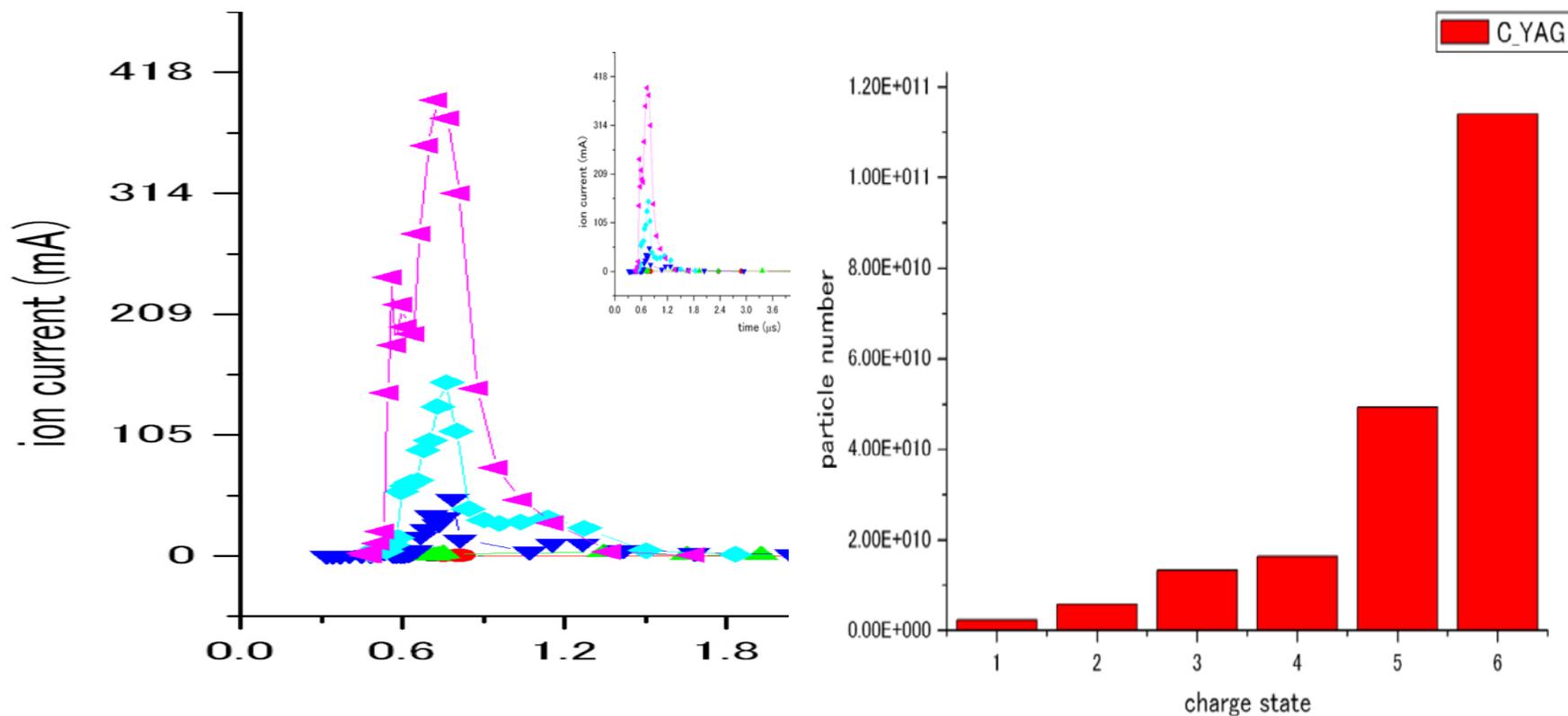
Charge State Distribution with Nd-YAG laser (0.5J)



- Charge state distribution depends on laser power density on the target.
- $1.58E+11W/cm^2$ is best for C^{6+} production
(C^{6+} is important for injection into synchrotron without stripper foil)

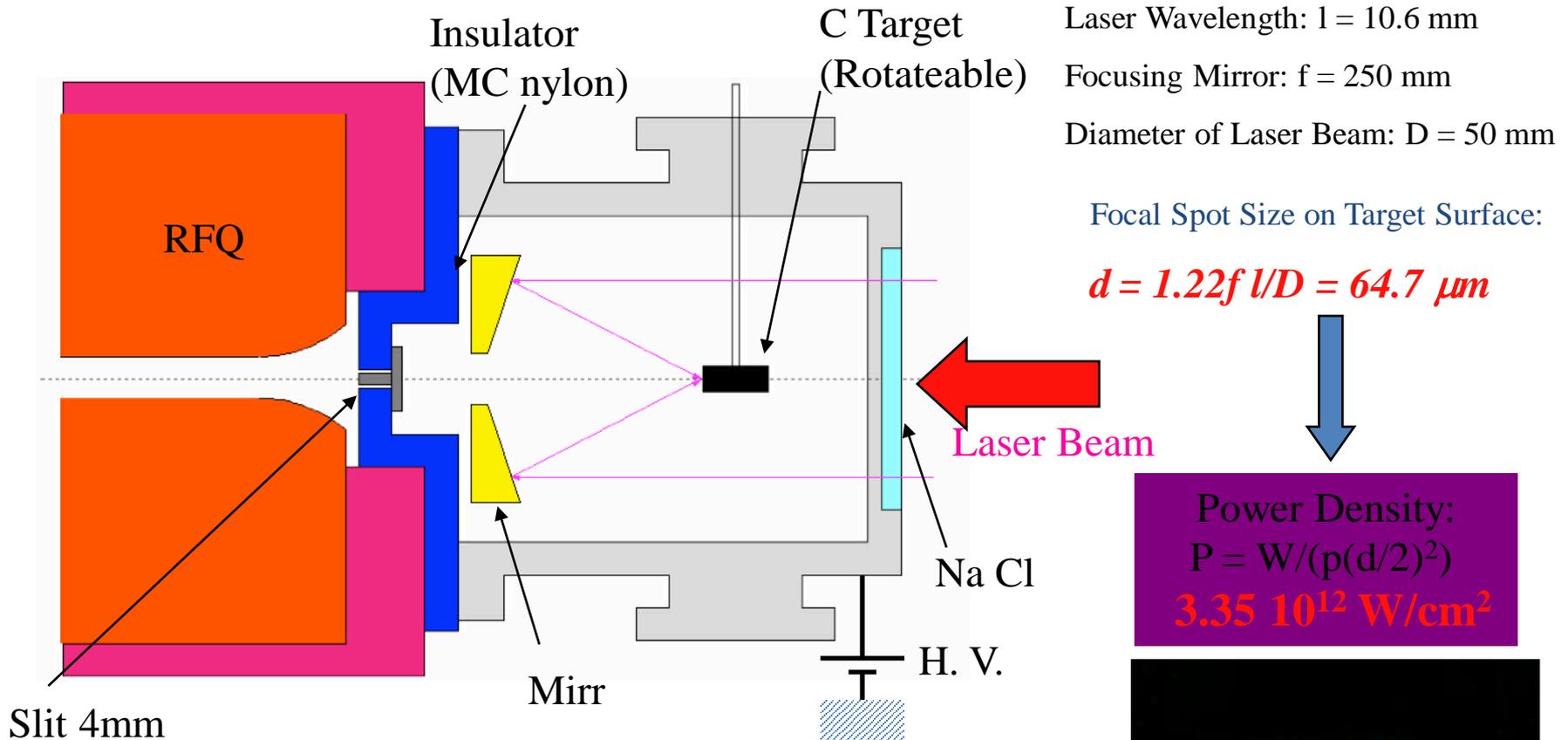
3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Charge State Distribution with Nd-YAG laser (2.5J)



3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Laser Plasma Target Chamber



Properties of the laser plasma

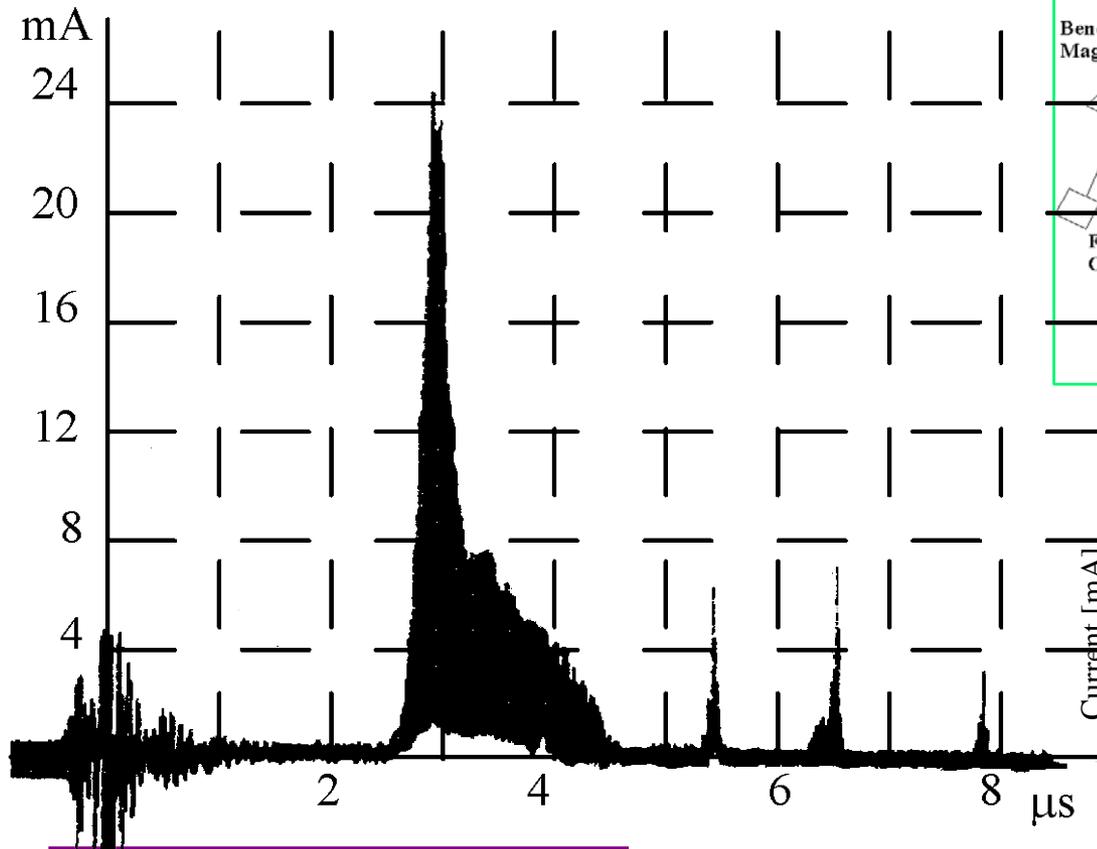
Energy of the ions : about 100 eV/u

Emission angle : less than ± 20 degrees



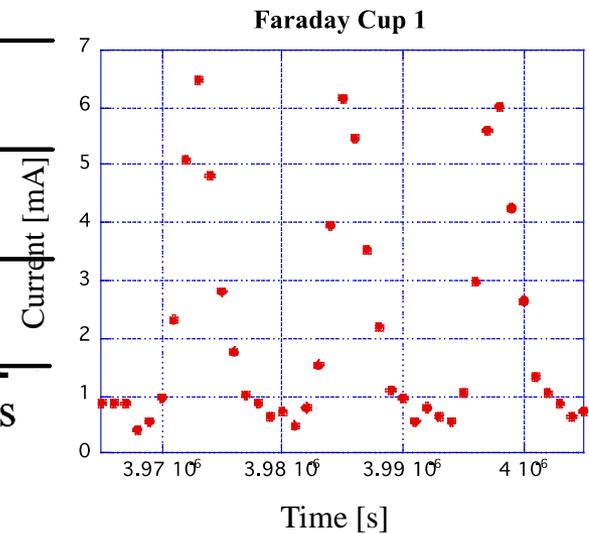
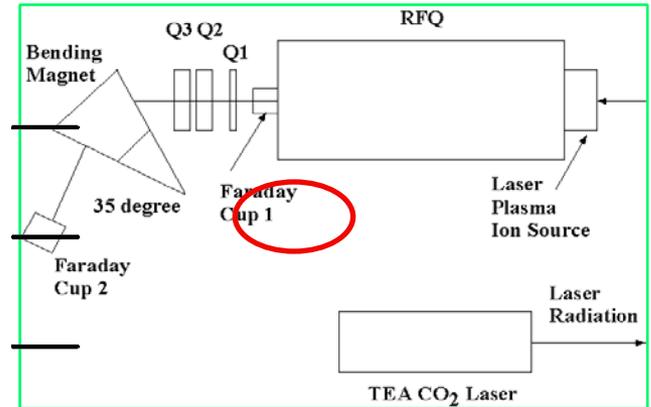
3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Measurement of the accelerated beam-just after the RFQ



Peak Current: 25mA
Averaged Current: 8mA
Pulse Width (90%): 1.24 μs

H. V. 16 kV
C ion beam
219 keV/u



Bunched Structure !!

3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

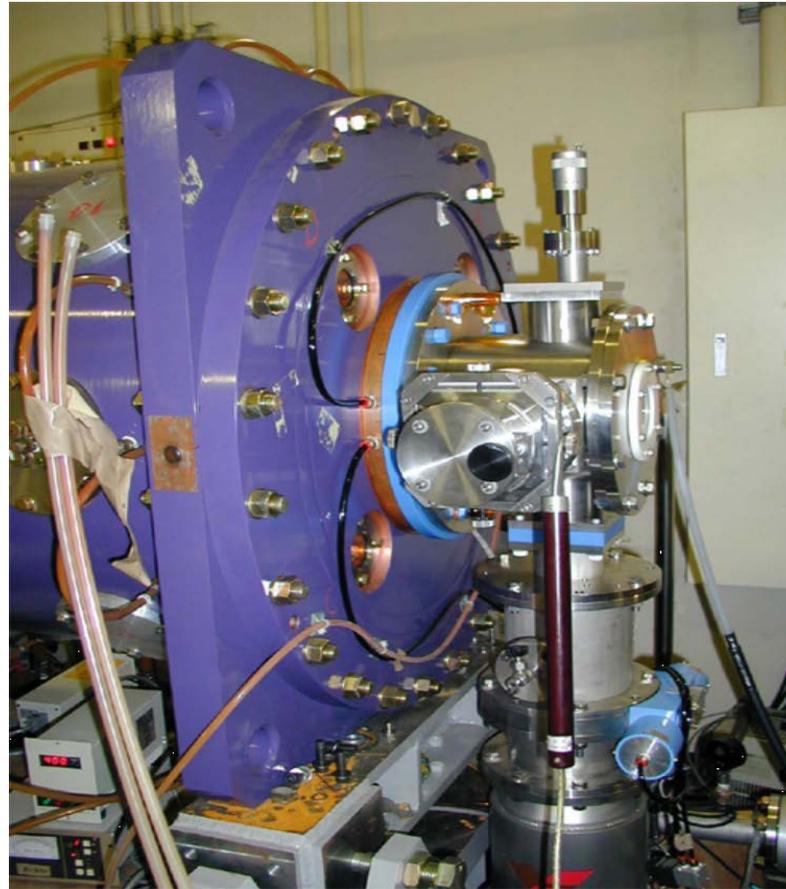
First Acceleration of POP-RFQ linac by DPIS with Laser ion source

10 mA of C^{4+} beam was accelerated at TITech RFQ Linac
(design 1.3mA)

Parameters of RFQ

Total Length 4.4m
Frequency 80MHz
Injection Energy 5keV/u
Output Energy 219keV/u
Charge to Mass 1/16
Transmission 68%
(6.8mA)
RF Power(1/16) 100kW

Out put intensity
of designed C^{4+} 1.3mA



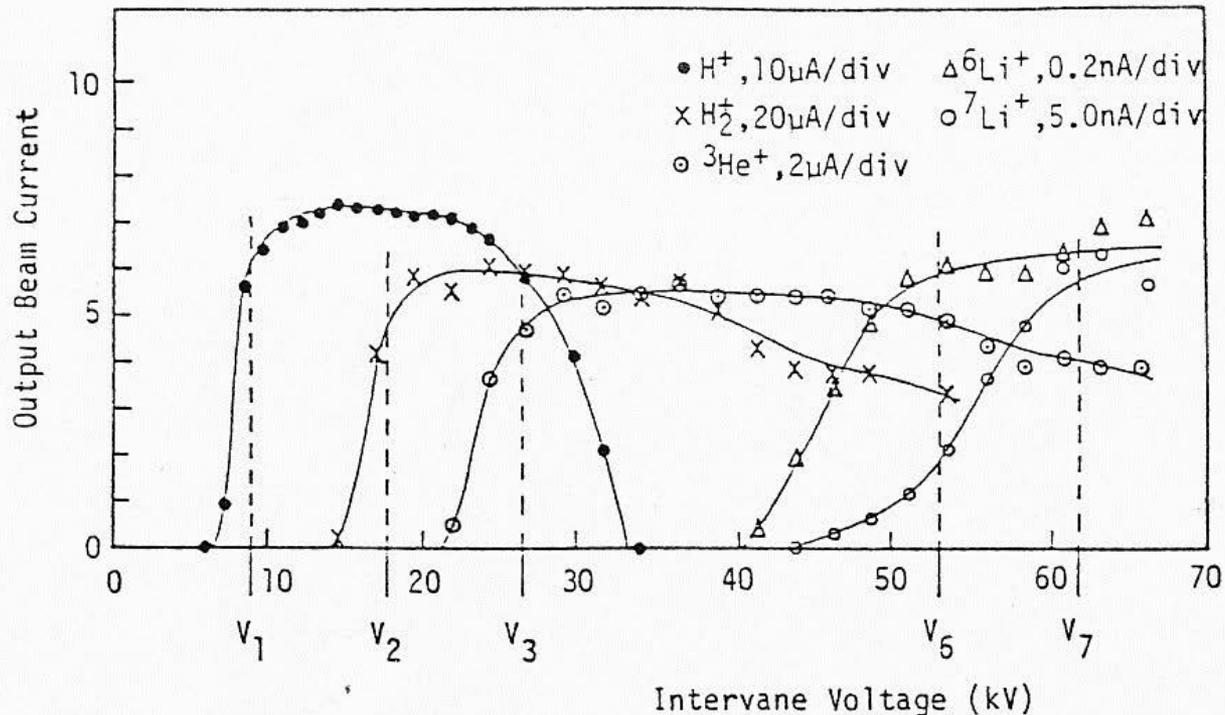
2001 4/23

3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Why ? Designed current C^{4+} 1.3mA and Accelerated 9.6mA

Multi-charge beam acceleration

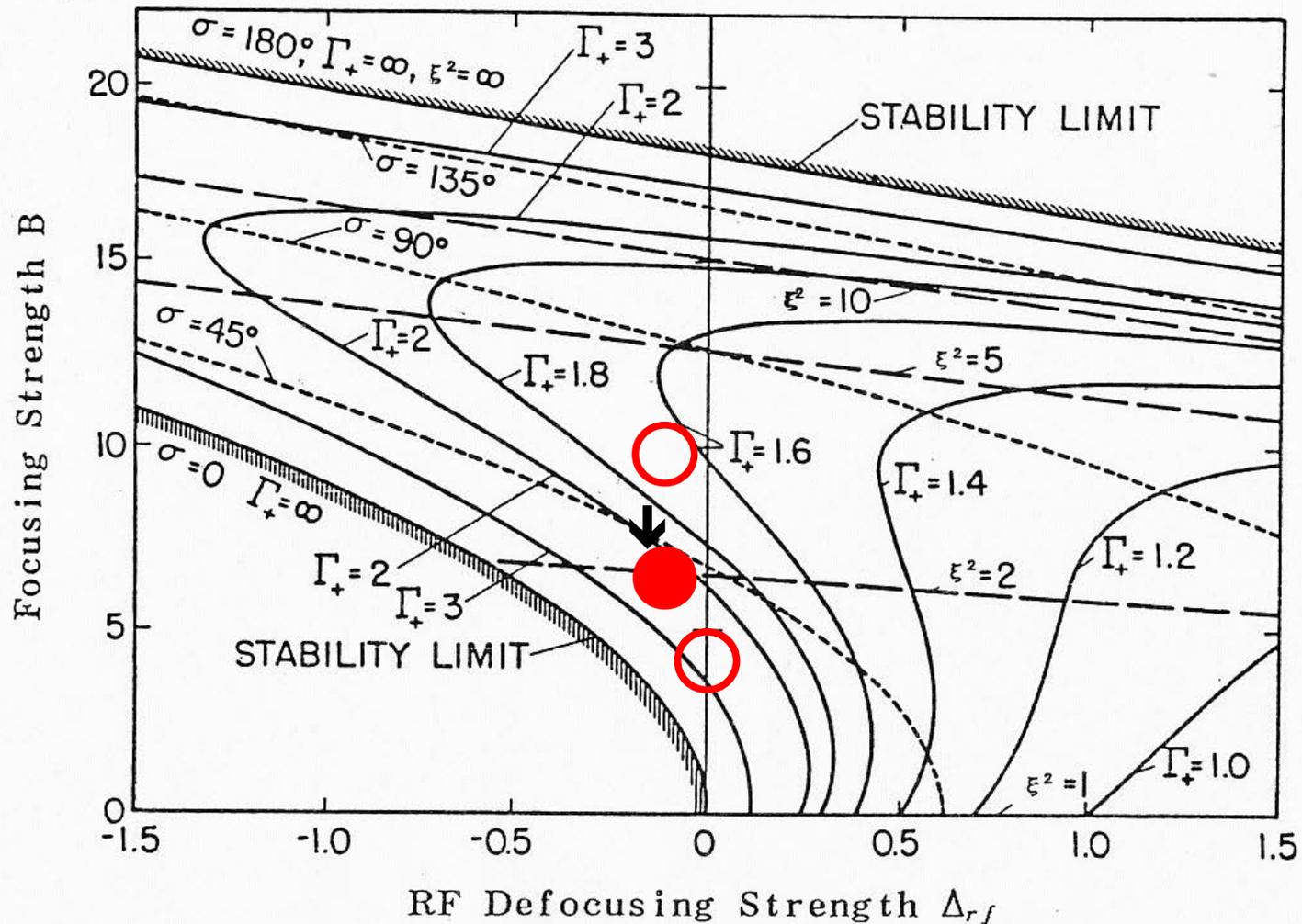
From PARMTEQM to pteq-HI (made by R.A. Jameson)



Vane Voltage vs Accelerated Beam Current (INS Heavy ion RFQ Linac)

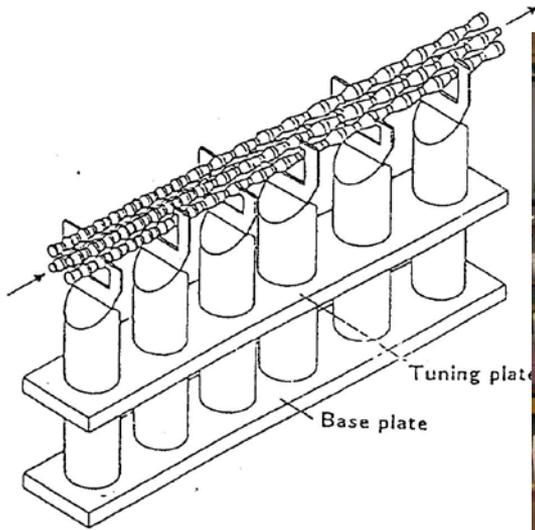
3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Movement of Focusing Strength(B) and Defocusing Strength(Δ) in 1st stable reason of Mashu equation



3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

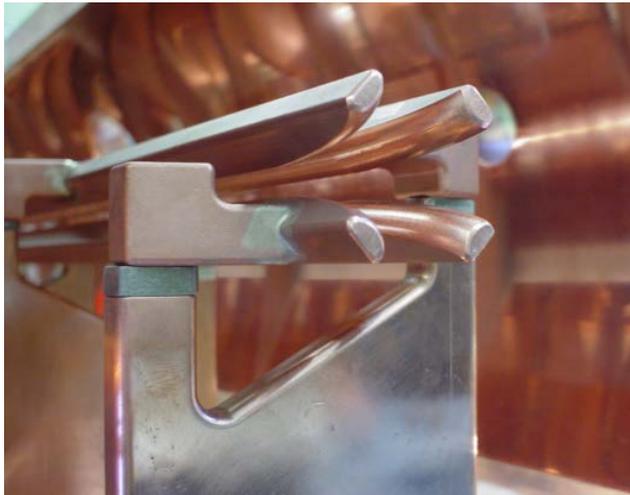
C⁴⁺ and C⁶⁺ beam Test 4 rod RFQ Linac cavity design and construction



C⁴⁺ and C⁶⁺
Input 20keV/u
Output 100keV/u

Calculated by Jameson
with pteq-HI soft

Designed and Construction
by Shemp and NTG Comp.

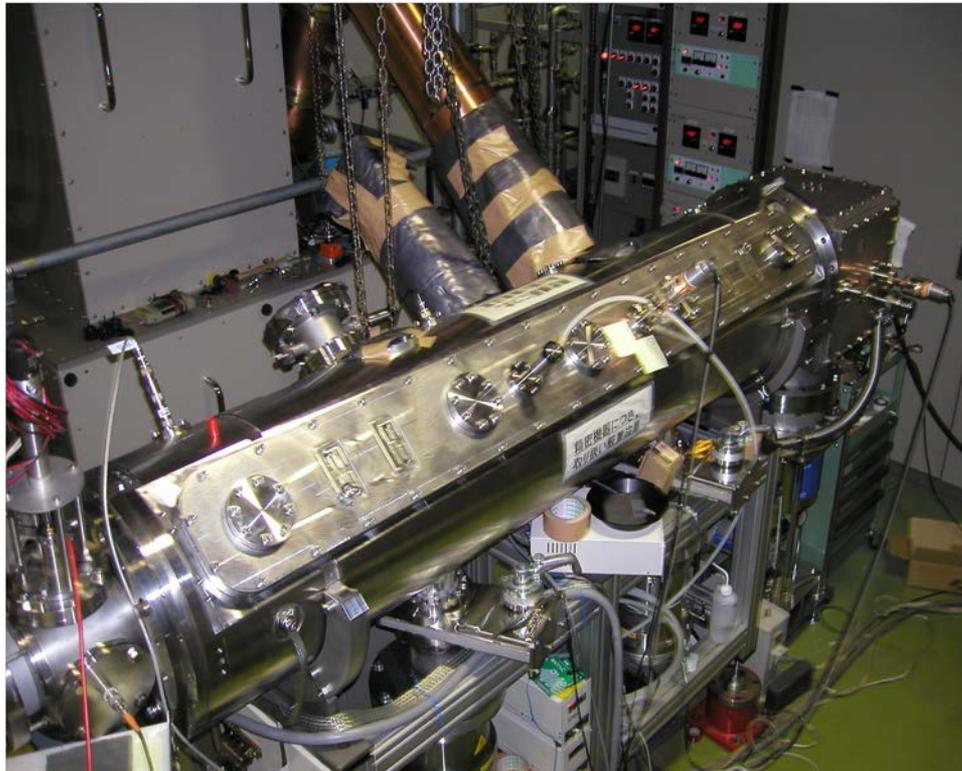


3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Test 4 rod RFQ Linac by DPIS with C⁴⁺ Laser ion source

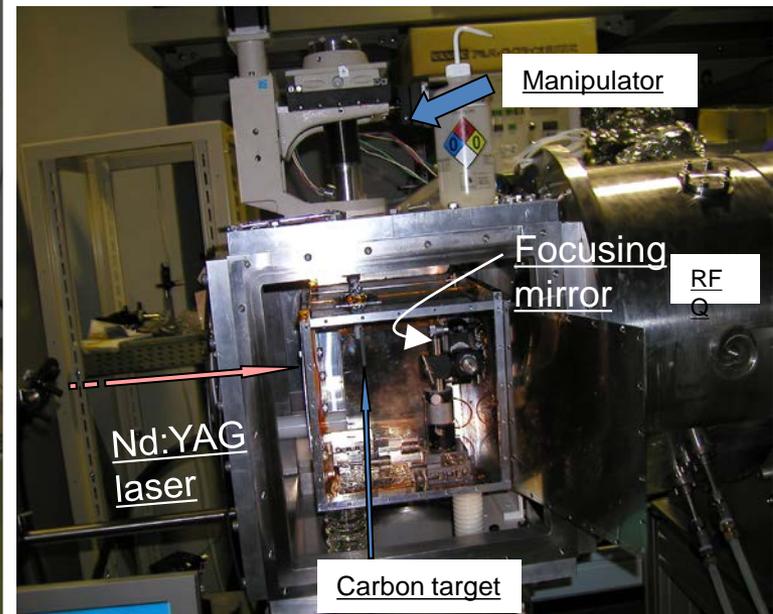
C⁴⁺60mA Acceleration

100mA Test RFQ linac by DPIS



Basic parameters of the RFQ

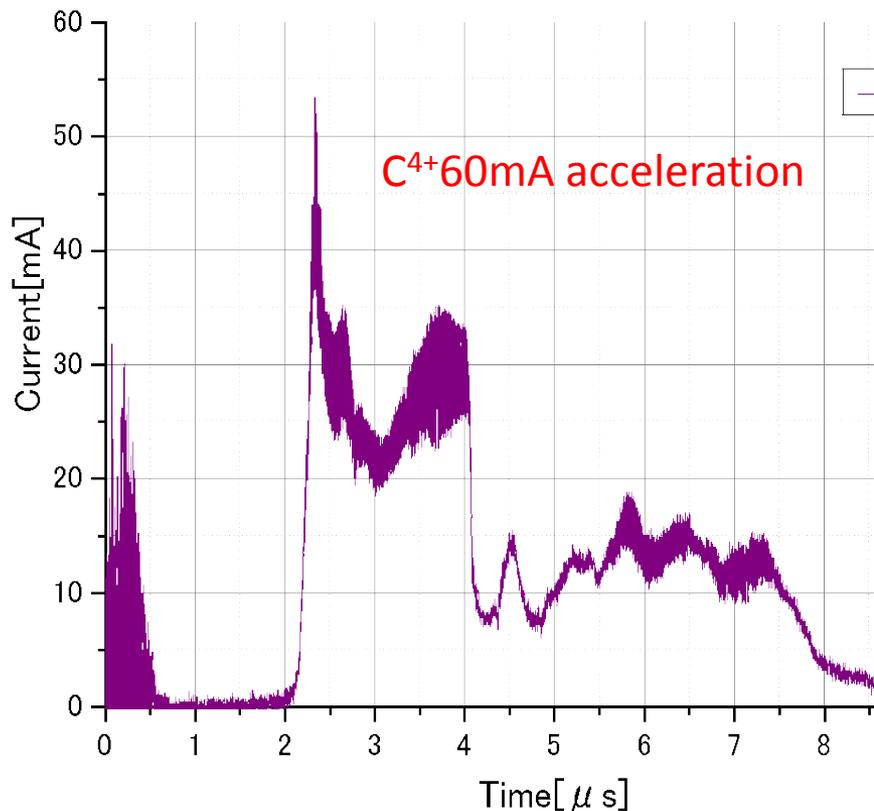
•Total Length	2.0 m
•Frequency	100MHz
•Injection Energy	20keV/u
•Output Energy	100keV/u
Aperture	6.6mm
•Maximum voltage	120 kV
•RF power	230 kW
•Output Intensity	
at 100 mA C ⁴⁺	76 mA
C ⁶⁺	51mA



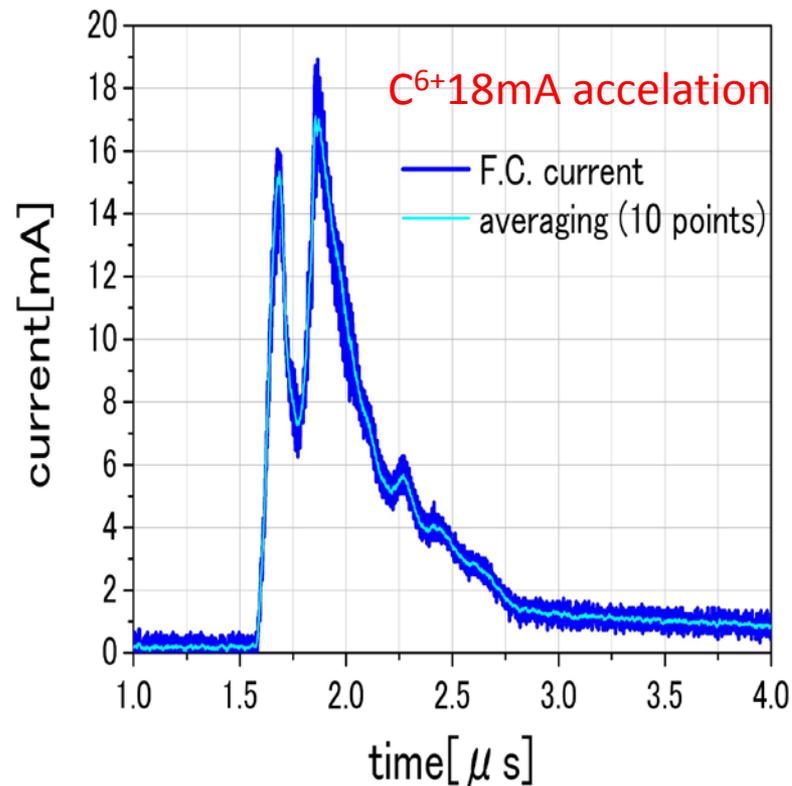
2004 Rod type RFQ for test high intensity acceleration C⁴⁺60mA, C⁶⁺18mA

3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

Typical pulse shape at just after the RFQ Linac



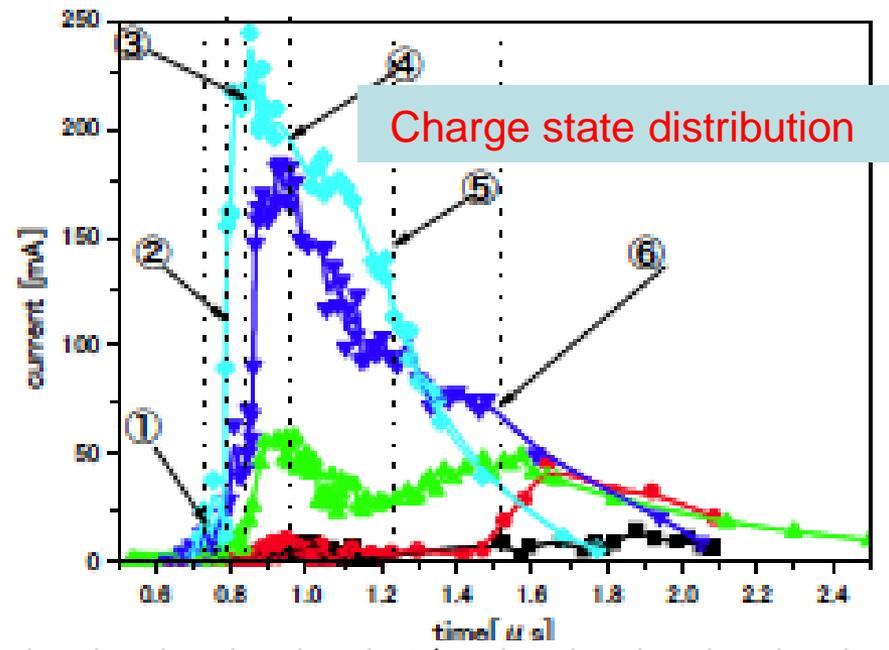
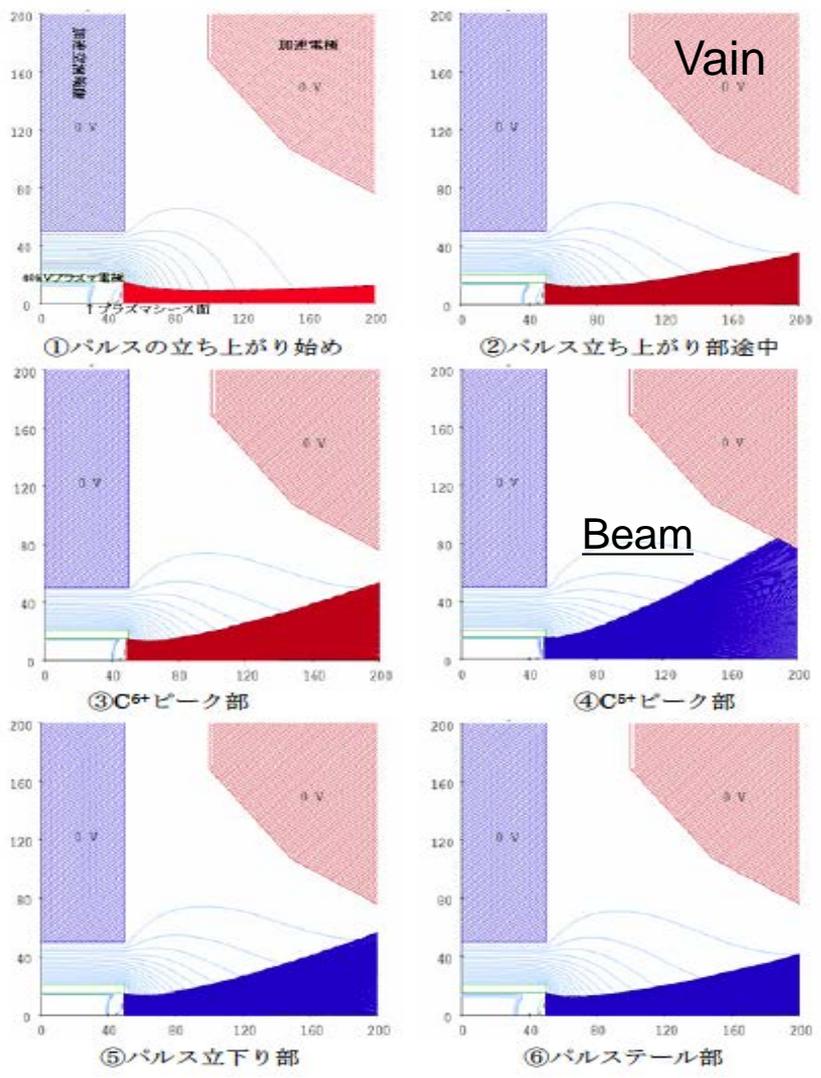
C^{4+} ion by CO₂ Laser(8.4J)



C^{6+} ion by Nd-YAG Laser(0.5J)

3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

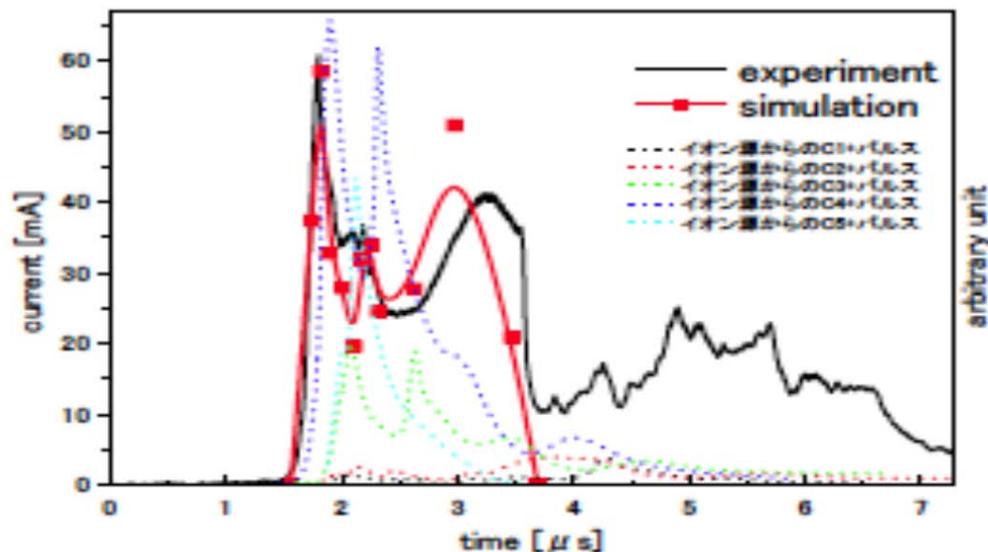
Time dependence beam ellipses by IGAN simulation



3. レーザイオン源を使用した直接プラズマ入射法によるRFQ加速の成功

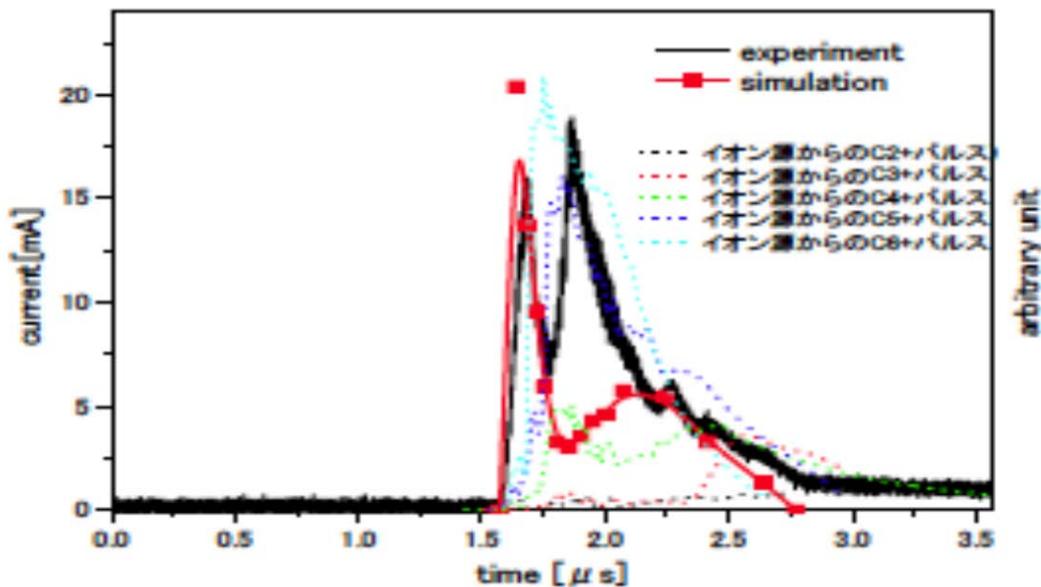
Experimental beam distribution

Simulation beam distribution using IGAN



Experimental beam distribution

Simulation beam distribution using IGAN



4. DPIS法でのマルチビーム RFQ-IH型線形加速器による加速成功

4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

Interdigital H (IH) 型加速空洞

IH型線形加速器は低エネルギー領域で高加速電力効率を持つ

**IH型は小型、省電力型で応用加速器に最適
(線形加速器ではIH型以外ない)**

• 103 MHz TIT
& TUM-IH

$$P = V^2 / ZL$$

P: Power loss

V: Acc. Voltage

Z: Shunt impedance

L: Linac (Cavity) length

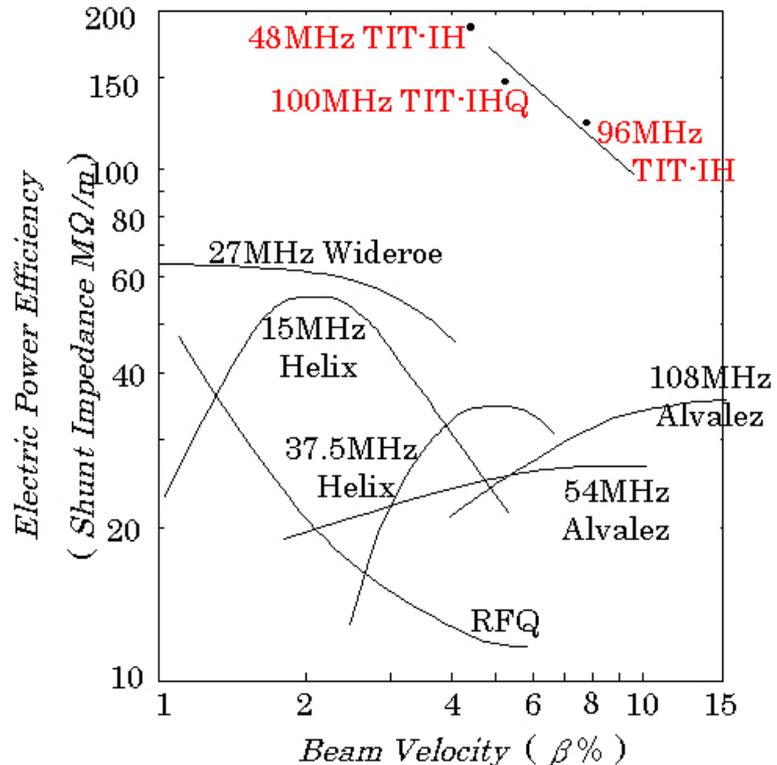
$$Z_{IH} = 9Z_{O.S.} \text{ (If)}$$

$$P_{IH} = P_{O.S.} / 9$$

If same power inject IH cavity

$$V_{IH} = 3V_{O.S.}$$

$$L_{IH} = L_{O.S.} / 3 \text{ \& } P_{IH} = P_{O.S.} / 3$$

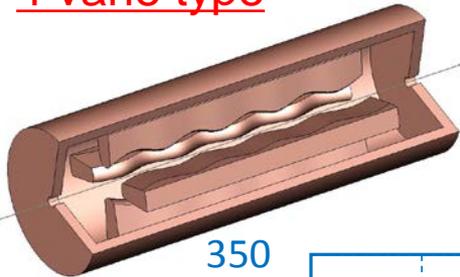


粒子速度に対する各種の線形加速器構造のZ

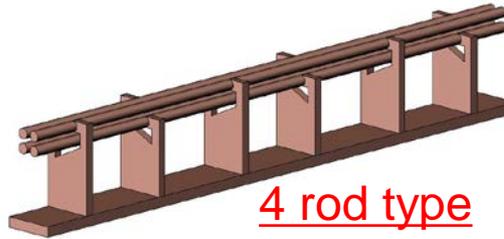
4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

Multi beam RFQ Linac Shunt impedances of different structures

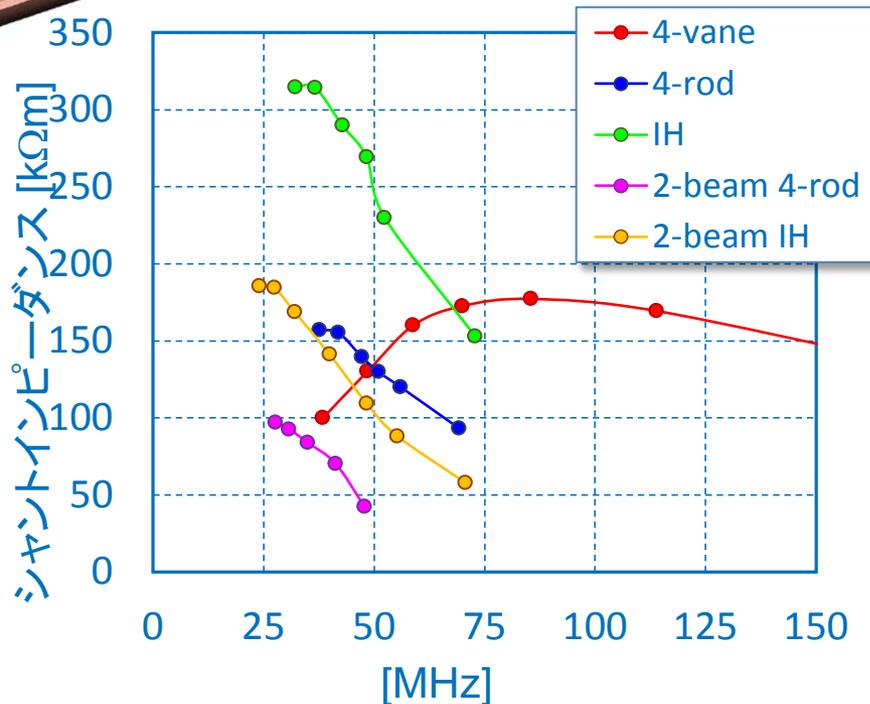
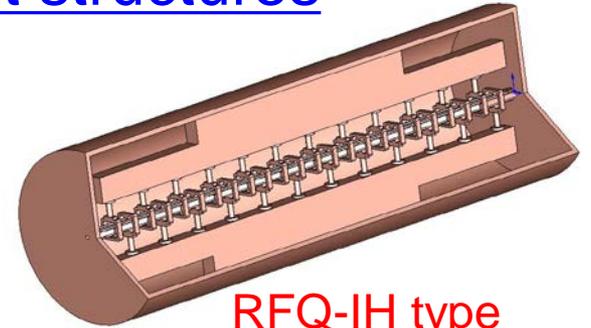
4 vane type



4 rod type



RFQ-IH type

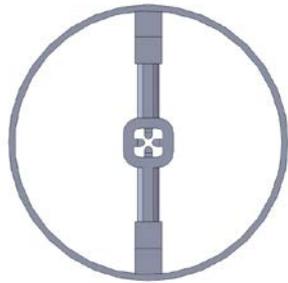


RFQ-IH type is best

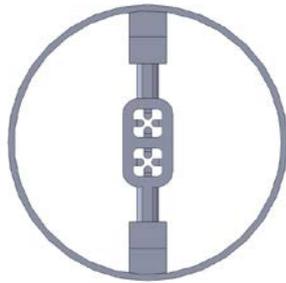
4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

Multi beam type RFQ-IH Linear Accelerator

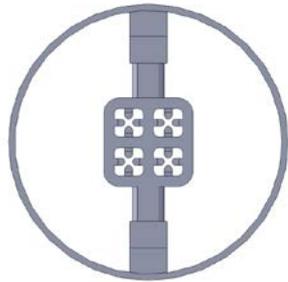
Multi beam Type RFQ-IH Structure



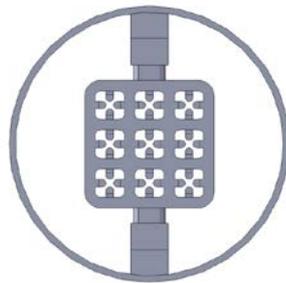
1 Beam



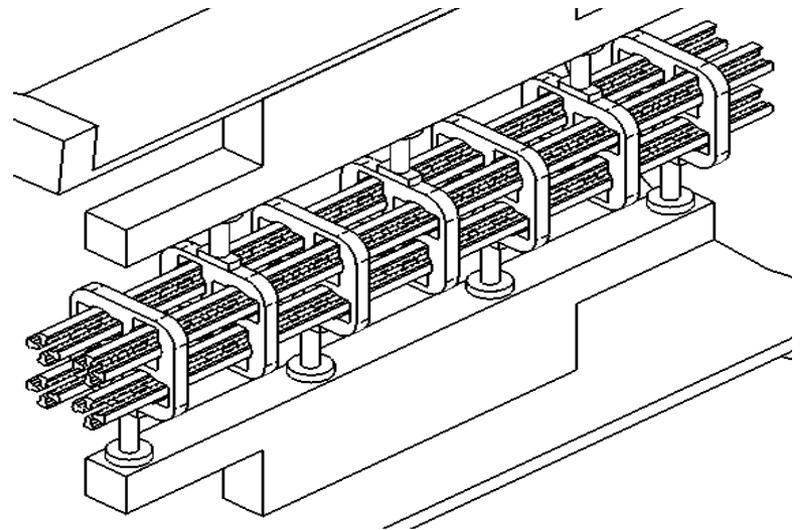
2 Beam



4 Beam



9 Beam



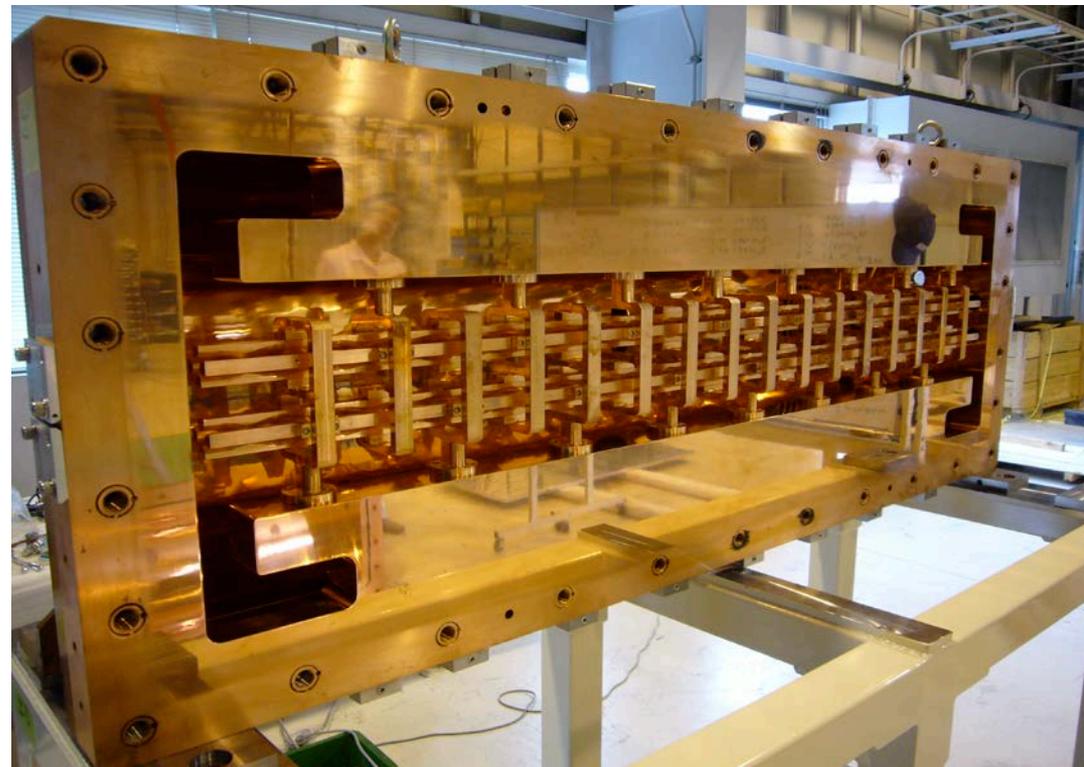
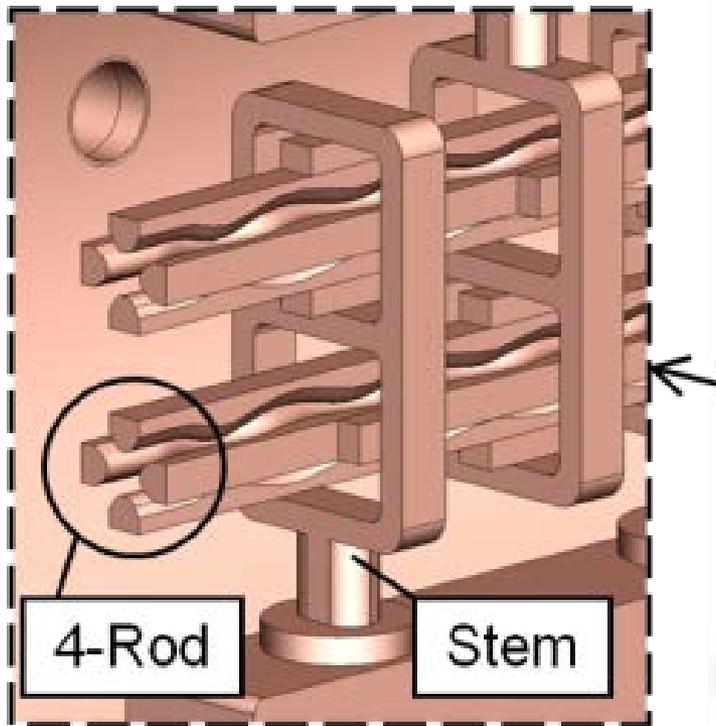
Schematic drawing of 4 beam type RFQ-IH Linac

4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

2 Beam type RFQ-IH Linac structure for POP of Multi-beam

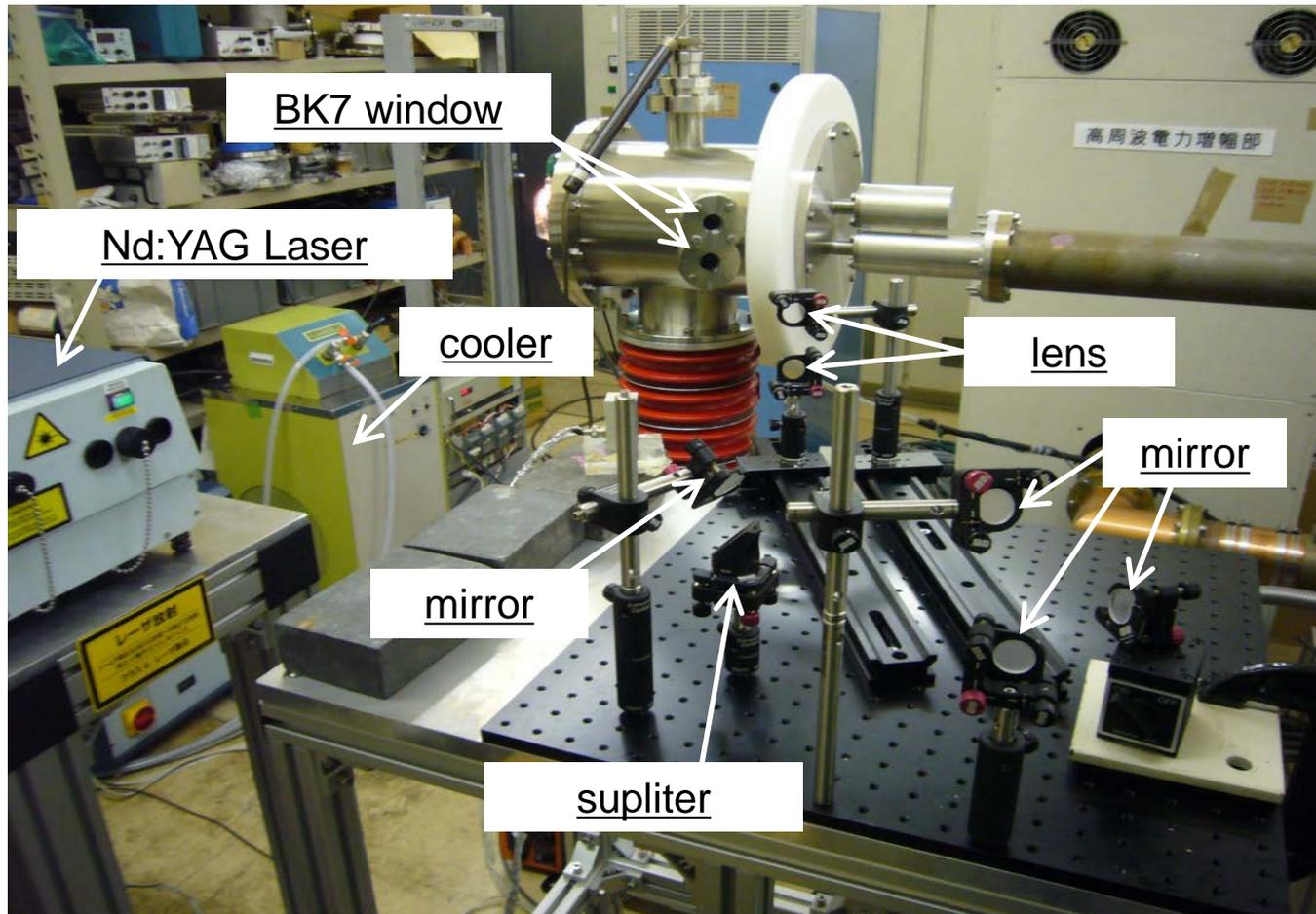
2 beam RFQ-IH linac

Photograph of 2 beam RFQ-IH Linac



4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

2 beam YAG Laser Ion Source

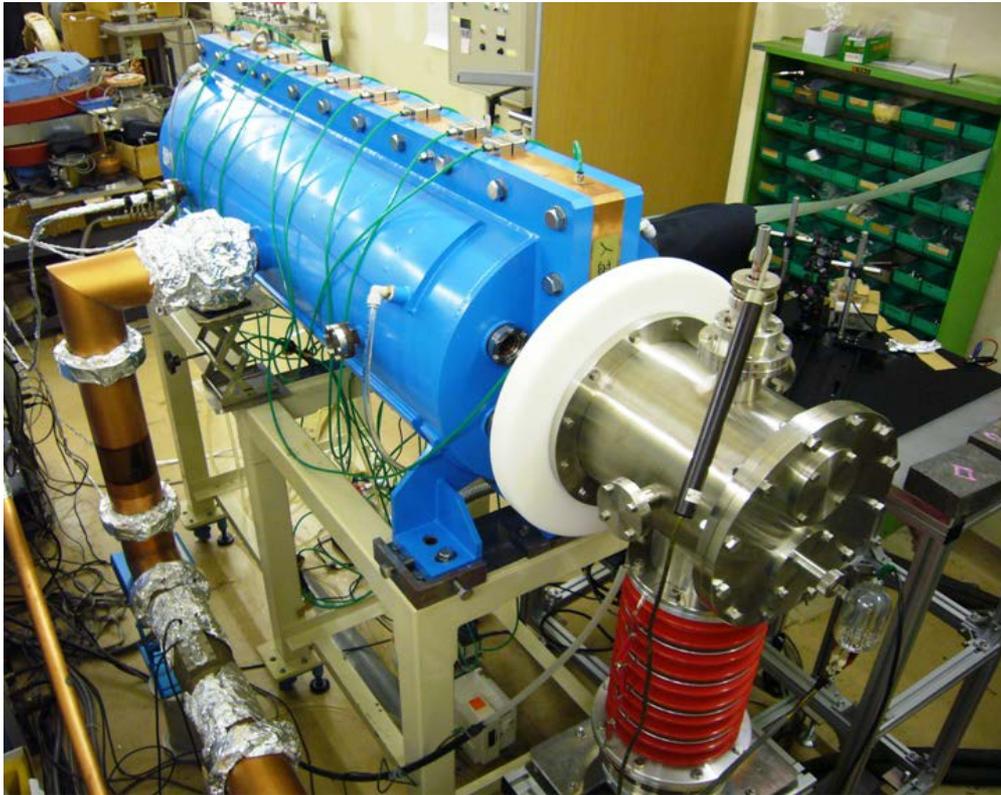


4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

2 beam RFQ-IH linac and Laser Ion Source

Accelerated $54\text{mA} \times 2 = 108\text{mA}$

Acceleration Test Stand



Main parameters of two-beam type RFQ-IH Linac

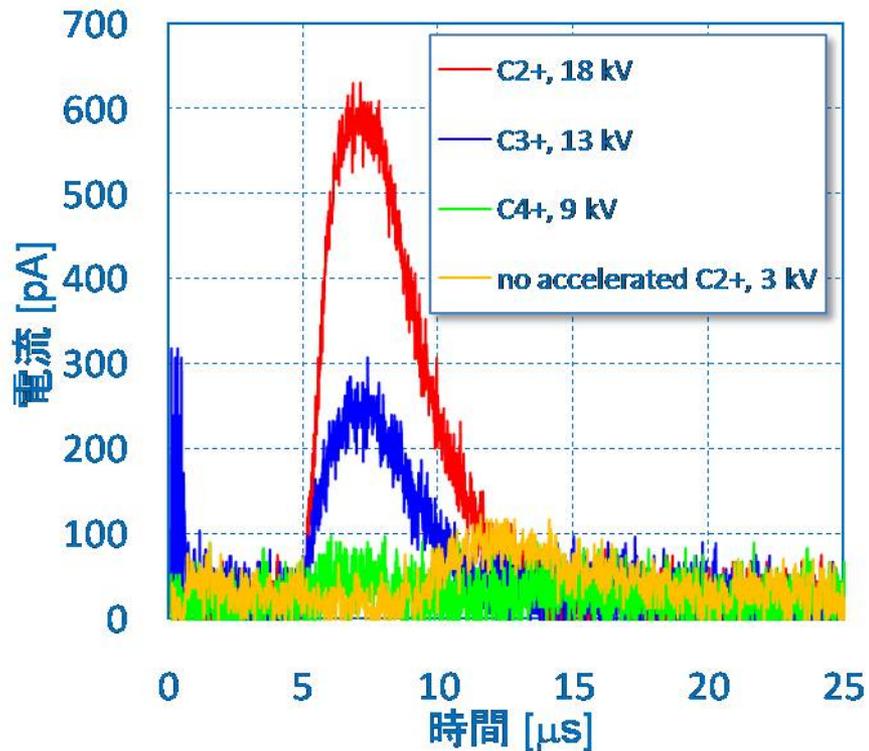
Charge to mass ratio	1/6(C2+)
Input energy(keV/u)	5
Output energy(keV/u)	60
Resonance frequency(MHz)	47
Beam current (mA)	54x2=108
Beam loss (kW)	35.6
Wall loss (kW)	31.5
Total power (kW)	67.1
Average bore radius (cm)	0.76
Focusing strength B	8.75
Defocusing strength	0.216
Rod length (cm)	148.1
Total number of cells	150
Cavity diameter (cm)	49.2
Maximum field (Kilpatrick)	1.8

2009 2 beam RFQ-IH Linac accelerated $54\text{mA} \times 2 = 108\text{mA}$

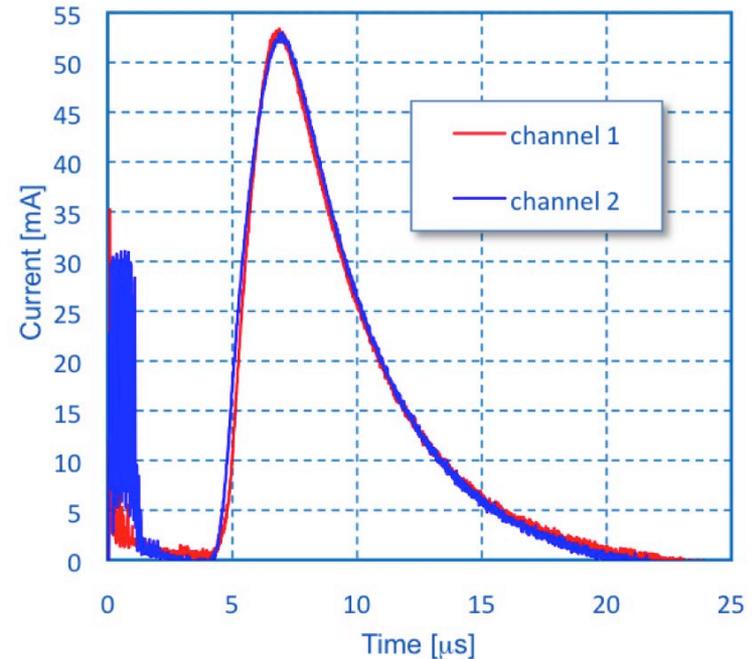
4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

2 Beam RFQ-IH Linac succeed to accelerate 108mA by DPIS with LIS

Reproduce of acceleration beam



Beams of channel 1 and 2

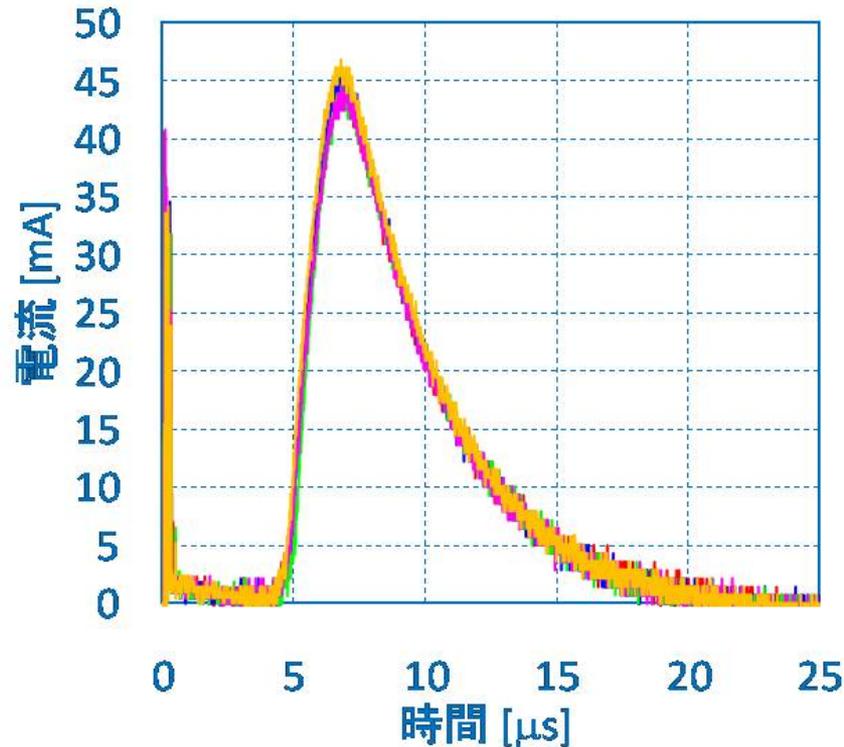


2 beam RFQ-IH Linac accelerated $54\text{mA} \times 2 = 108\text{mA}$

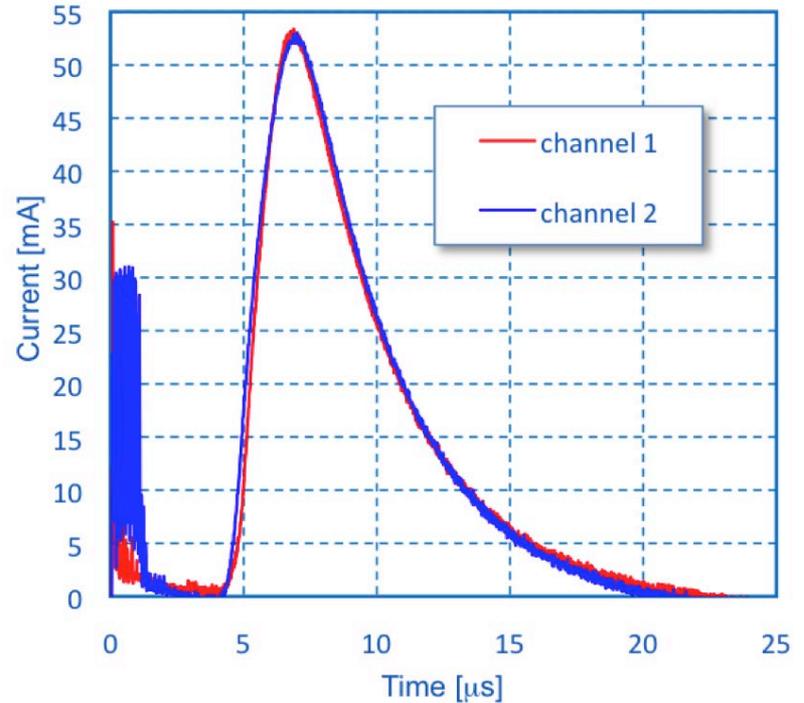
4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

2 Beam RFQ-IH Linac succeed to accelerate 108mA by DPIS with LIS

Reproduction of output beam

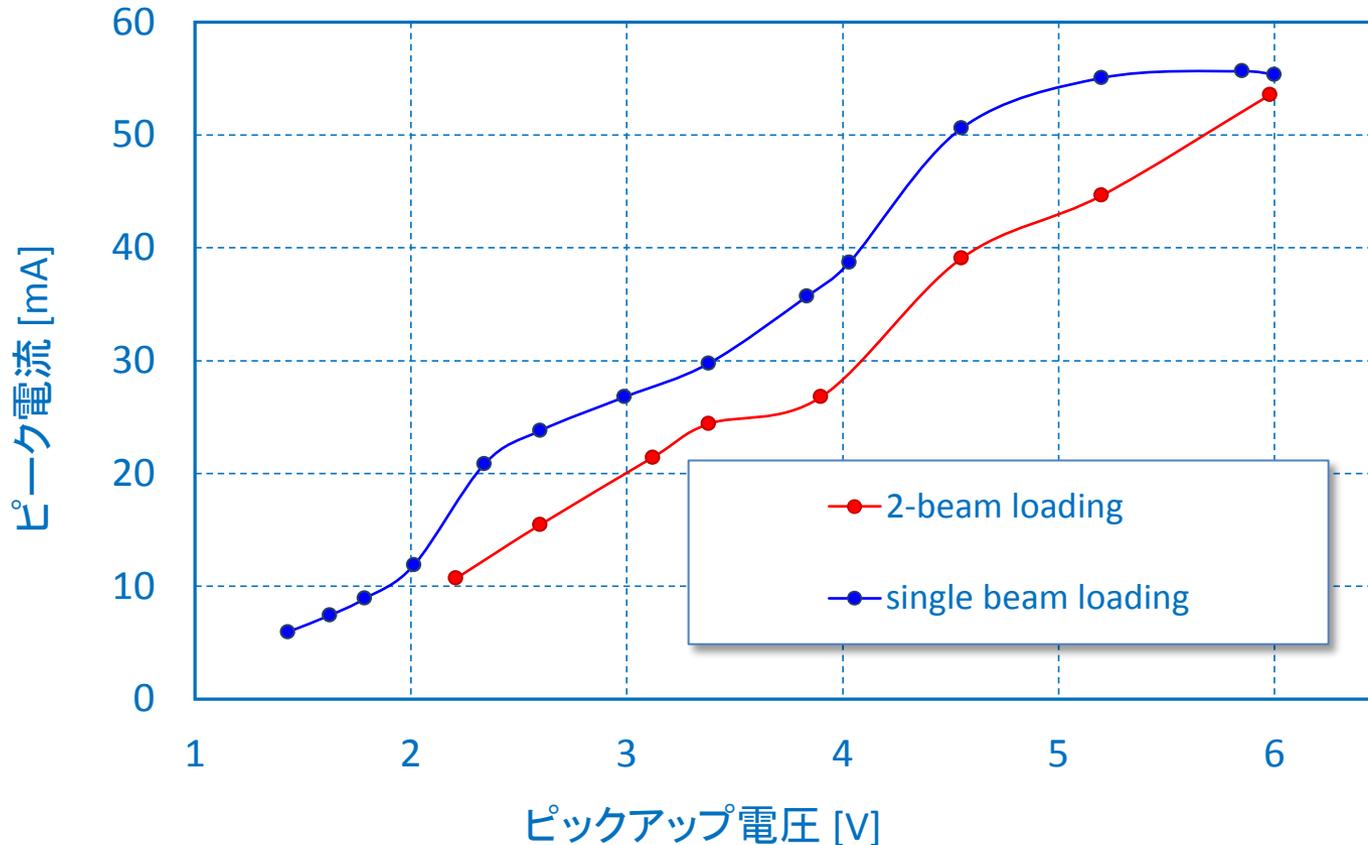


channel 1 and 2



4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

シングルビームローディングにおける加速特性

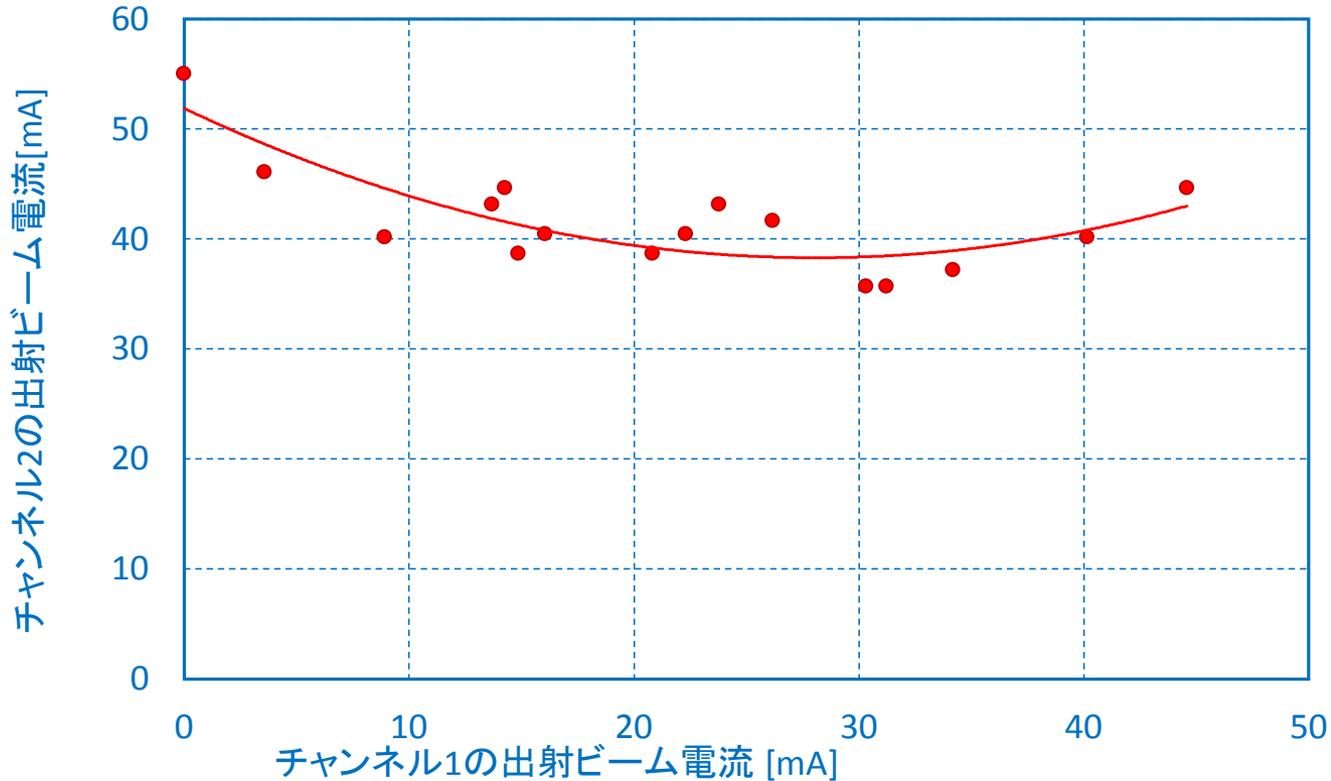


- シングルビームローディングでは、2ビーム加速に必要なだった電力のうちビーム1本分の電力をロッド間電圧の上昇のために使用できるため、同じ投入電力でビーム電流が増大。

出射ビームは約55.6 mAで飽和しており、2ビームローディングにおいて投入RF電力をさらに増やすと、この値に収束すると考えられる。

4. DPIS法でのマルチビームRFQ-IH型線形加速器による加速成功

マルチビームの相互ローディング



- チャンネル1への入射電流値を一定にし、チャンネル2への入射電流値を変化させた。
- しかし実験の結果、チャンネル2の減少とともに、それに引きずられるようにチャンネル1の電流量も減少した。

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる 大強度重イオンビーム加速への展開

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開

History of HIF RF Driver

20 Century

- * 1975 RFQ Linac Acceleration at ITEP
- * 1980 RFQ Linac 95% Accelerate at LANL
- * 1982 HI RFQ Linac Acceleration at INS

Break-through

1980~1984 Designed Power Plant (1GW) on HIF (Germany, Japan, USSR)
RFQ $30\text{mA} \times 16\text{sets} = 480\text{mA}(\text{Pb}^+)$

.....

21 Century

- * 2001 RFQ accelerated 10mA by DPIS with Laser IS at Titech (Japan)
2004 New RFQ accelerated 60mA at Titech, Riken and NIRS (Japan)
- * 2009 2beam RFQ-IH linac accelerate 108mA at Titech (Japan)

Break-through

Application accelerator of high intensity beam (p,d,He,HI...n)

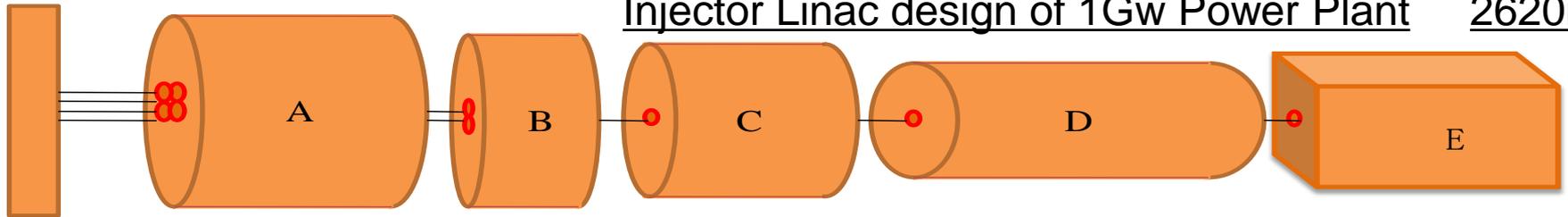
201 ? HIF Multi beam Test and Basic study facility in Japan

One Cavity with 4 beam channel $100\text{ mA} \times 4 = 400\text{ mA}$ for HIF

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開

新ブレークスルーに基づく100万kW発電プラント

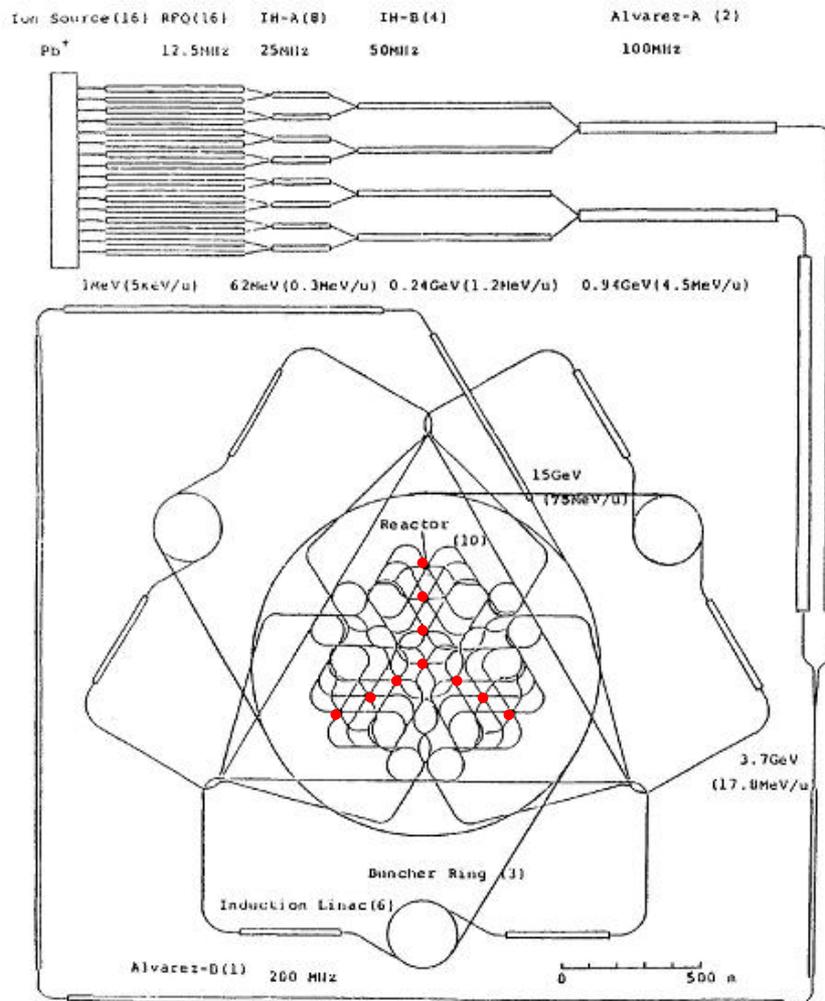
Injector Linac design of 1Gw Power Plant 2620m



イオン源
Pb+

	RFQ-IH		DT-IH		DT-IH		DT-IH		SC	
線形加速器構成	RFQ-IH(A)		DT-IH(B)		DT-IH (C)		DT-IH(D)		SC(E)	
	入射	出射	入射	出射	入射	出射	入射	出射	入射	出射
エネルギー(MeV/u)	0.005	0.3	0.3	1.2	1.2	4.7	4.7	10.0	10.0	50.0
周波数(MHz)	10		20		40		80		160	
電流(mA)	115		220		400		400		400	
ビーム数	4		2		1		1		1	
加速位相(度)	-90→-30		-45		-45		-45		-45	
加速効率(MV/m)	0.23		1.0		1.5		2.0		7.0	
磁場勾配(K _G /cm)	-----		12		22		60		62	
加速電圧(MV)	0.287(Vane)		187		728		6510		8320	
平均加速電圧(kV)	-----		285		428		700		1574	
β(v/c)	-----		0.025	0.050	0.0507	0.053	0.100	0.145	0.135	0.315
セル長(cm)	-----		19.0	38.0	19.0	37.5	18.8	27.23	13.6	29.52
ギャップ長(cm)	-----		6.33	12.66	6.33	12.5	6.20	9.07	3.53	9.84
DT長(cm)	-----		13	25.34	12.67	25.00	12.5	18.16	9.08	19.68
空洞直径(cm)	160		133		133		73		1500(高さ)	
全長(m)	231		187		485		3255		1189	
セル数	1385		656		1702		9300		5283	
分割個数	20m×11		20m×9		20m×24		20m×28		20m×59	

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開



History of HIF

20 Century

- 1975 RFQ Linac Acceleration at ITEP
- 1980 RFQ Linac 95% Accelerate at LANL
- 1982 HI RFQ Linac Acceleration at INS

Brake-through

- 1980~1984 Designed Power Plant (1GW) on HIF (Germany, Japan, USA)
- RFQ 30mA x 16 sets = 480 mA (Pb⁺)

21 Century

- * 2001 RFQ accelerated 10 mA by DPIS with Laser IS at Titech
- 2004 New RFQ accelerated 60 mA at Titech and Riken
- * 2009 2 beam RFQ-IH linac accelerated 108 mA at Titech

Brake-through

- 20. ? HIF Multi beam Test facility in Japan
- One Cavity with 4 beam channel

Layout of inertial confinement fusion reactor 1GW plan named HIBLIC in Japan (1984)

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開

HIF基礎研究用装置の検討

重イオン慣性核融合(HIF)ドライバーにおける問題点結果

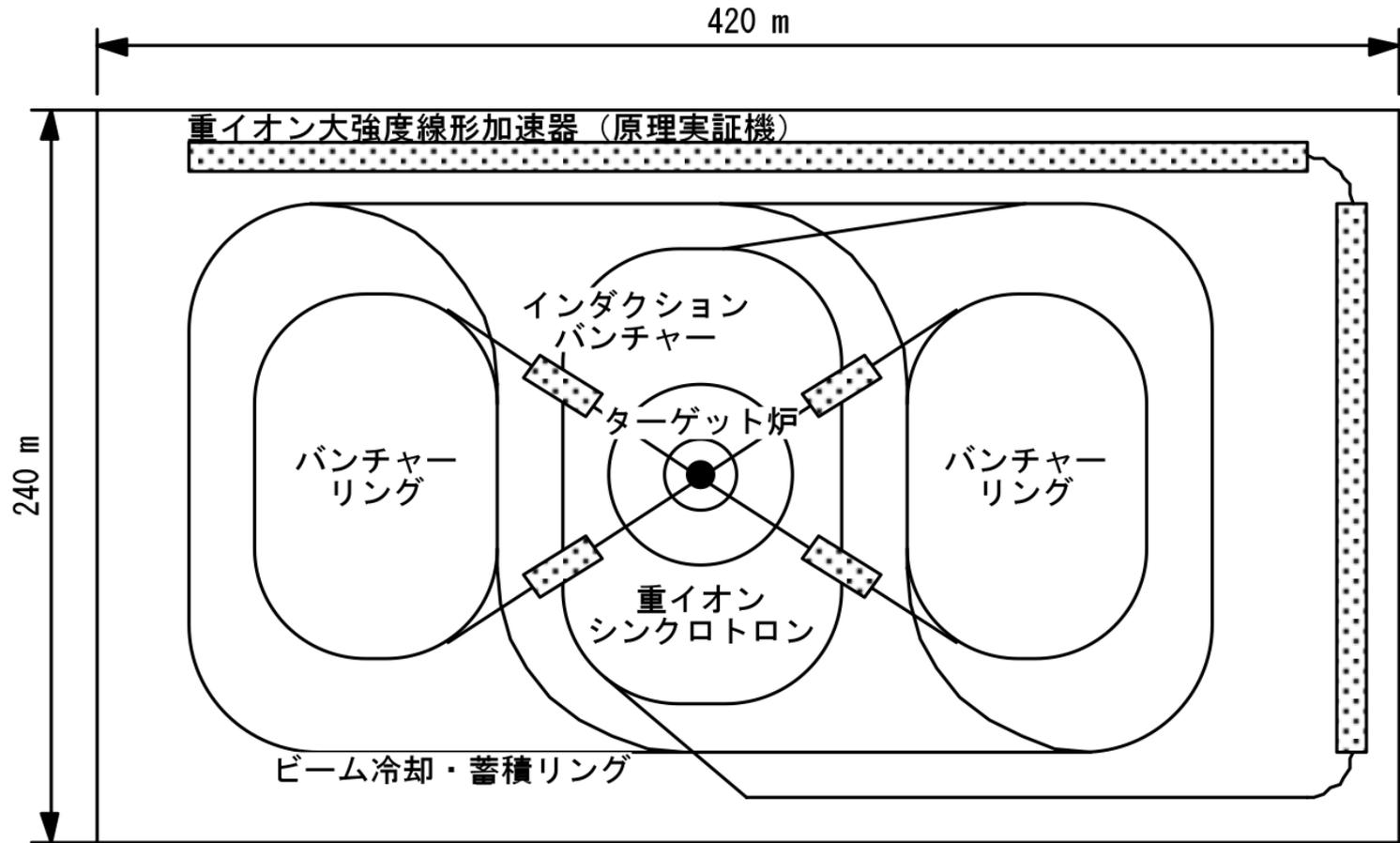
- 1) 重イオン加速の初段のクーロン反発力(空間電荷効果)に打ち勝って大強度ビームを加速する線形加速器の小型化の技術
- 2) ロングビームパルス短バンチ化する各種のビーム制御技術
- 3) ビームの最終収束しターゲット加熱の技術
(レーザ核融合で検証中)

結果 各種の核融合比較の土俵に上がることができる。

- 1) が最大の解決目標であり、HIFドライバー加速器の最大の問題を21世紀のブレークスルーとなる加速器技術を投入し原理実証機を製作して解決する。

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開

4 beam RFQ-IH linac and HIF Driver for Basic Study



重イオン慣性核融合(HIF)ドライバー基礎研究装置

5. 21世紀の2つのブレークスルーによる大強度重イオンビーム加速への展開

4 beam RFQ-IH linac and HIF Driver for Basic Study

Parameters of 4 Beam RFQ-IH model

Parameters of RFQ-IH model Cavity

Type of cavity	RFQ-IH(4 Rods)type
Focus of beam	4 beam of 4 rods
Operation frequency(MHz)	22
Cavity diameter (mm)	670
Cavity length(mm)	1100
Length of ridge(mm)	880
Distance of ridge to ridge(mm)	335
Length of rod(mm)	1080
Diameter of rode(mm)	16
Diameter of bore(mm)	16
Total number of cell	no modulation
Distance of 4 beam(mm)	68
Distance of electric disk(mm)	135
Length of cutting ridge(mm)	205



6. 大強度ビーム加速器研究と 核融合基礎研究の問題点

6. 大強度ビーム加速器研究と核融合基礎研究の問題点

大強度重イオンビーム加速器技術開発研究の問題点

A. 電子の大強度加速の研究

世界的研究として、国際リニアコライダーやBファクトリーとして高エネルギー加速器研究機構(KEK)やX線自由電子レーザーがSpring-8で高額予算の研究が進められている。

B. 陽子の大強度加速の研究(最も軽いイオン)

東海村のJ-PARCから始まり大きな予算規模で行われている。

C. 重イオン大強度加速の研究

予算的支援はゼロ、支援する研究所が無く、非常に平衡性に欠けている。

重イオン大強度加速の研究の継続の問題

日本のHIF計画を提案したのは1983年であり、それから20数年を経過し、当時の若い世代も60才中を越えているため、研究の継承は今を逃したら不可能。HIF研究だけでなく日本の大強度重イオン加速技術は根こそぎ滅ぶことになるろう。

6. 大強度ビーム加速器研究と核融合基礎研究の問題点

核融合基礎研究の問題点

A. 磁場閉じ込め核融合

- a. JT-60とITERの基礎研究の那珂研が作られた
- b. ヘリカル型の基礎研究に核融合研が作られた

それぞれ数千億円を支援
一千数百億円程度支援

B. 慣性閉じ込め核融合

- a. レーザ慣性核融合に阪大核融合研究センター
米国、フランス
- b. 重イオン慣性核融合の研究センターが無く

百数十億円の研究支援
数千億円を支援
支援無し

(慣性核融合はレーザーの発振のエネルギー変換効率が非常に悪く、実際の商業炉になるのは重イオン慣性核融合と考えられている)

磁場閉じ込め核融合のトカマク型に対して、
慣性核融合の最終的本命と目される重イオン慣性核融合研究へ日本で支援無し

これは大きな矛盾であり平衡性に欠ける。

6. 大強度ビーム加速器研究と核融合基礎研究の問題点

服部は研究者として核融合のどの方式が良いか現在のところ、判断できるデータを持っていないため判断はできない。

HIFの基礎的研究が行われていないためである。

1980年中頃の技術で概念設計が行われた。

大型化する問題しか今も分かっていない。

HIFの基礎研究も行われていないため、

どこに問題が有るのか、無いのかさえ解明されていない。

HIFドライバーの大型化の問題が21世紀のブレークスルーにより解決される。

そのためになにも問題が無いと言い切れるかも知れない。

HIFドライバーの原理実証機を使い、ビームバンチングと

ターゲット加熱の基礎研究を行う。

HIFドライバーの大型化以外に問題が無いがどうかの結論を出す必要がある。

各種の核融合比較のやっとならば上がることができる。

7. まとめ

7. まとめ

1980年代のHIFに対する20世紀のブレークスルー
ソ連のRFQ型線形加速器の発明

各国の重イオン慣性核融合(HIF)の概念設計の提案と成った。
それを先導したのはブレークスルーを見つけた米国LANL研と
大きな重イオン加速器研究の独GSI研であった。

2001-2009年のHIFに対する21世紀のブレークスルー
日本の直接プラズマ入射法(DPIS)の発明
日本のマルチビーム型RFQ-IH線形加速器の発明
日本の1大学の1研究室のものである。

新しいHIF研究は日本がまず進め、次に世界のイニシャチブを取ってさらに進める。
日本には大強度重イオン加速器の研究所は存在せず。
重イオン慣性核融合を研究する研究所も存在しない。

真の重イオン加速器の研究所が日本に存在しないことが悔やまれる。

7. まとめ

21世紀のブレークスルーは日本の発明

1. 直接プラズマ入射法
2. マルチビーム型RFQ-IH線形加速器

真の意義を欧米の重イオン加速器研究所が理解すれば、
欧米に先を越される可能性は非常にあり得る。

これまで研究に大きな支援がないため

日本で生まれた研究成果の発展を外国勢に先を越される事例が幾つかあった。

日本に逆輸入され2番、3番煎じに、大きな予算が大研究所に付き研究を始めるのが
日本の常である。

さらに言えば2番、3番煎じでなければ大きな研究予算が取れないのが日本の科学行政、
科学支援の特徴である。

日本では科学研究に大きな支援を決定するのは高位の科学行政と科学者会議。
意味を理解しない行政官が無難な2番、3番煎じを支援することは論を俟たない
これまでの科学・文化研究支援環境で成果を上げた議員にそれを要求するのは
また無理。

日本の研究支援環境がここ数十年変わらないのに

1番煎じのものに、特に1大学1研究室に大きな支援予算を付けることは無理であろう。

結局よい方法が見つからないのが現状で、こまったことである。

7. まとめ

結局よい方法が見つからないのが現状である。

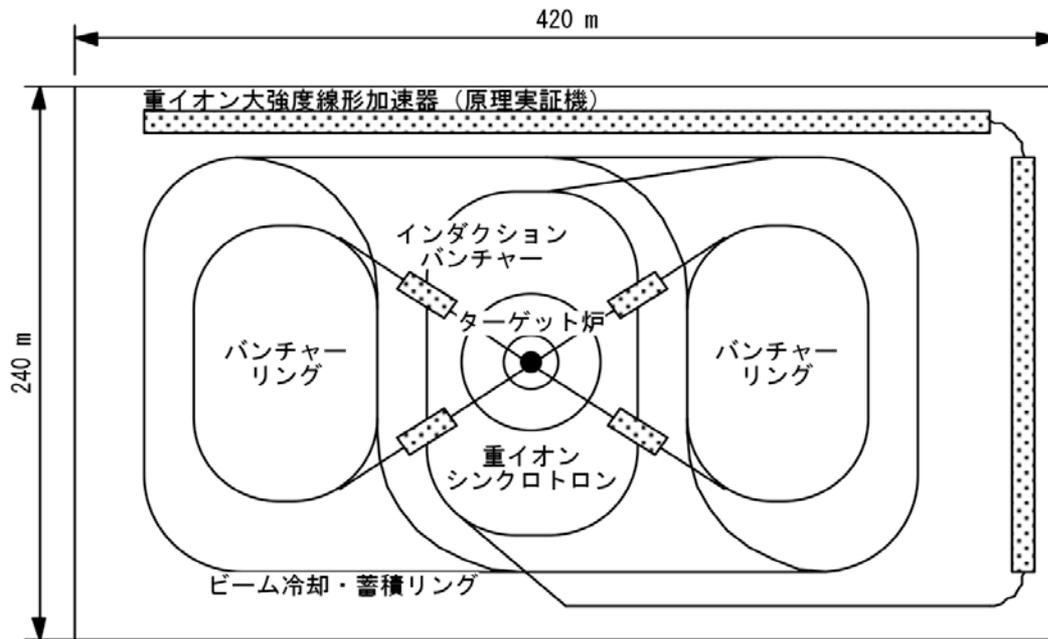
ここ6年、服部は愛国主義者に変身し、直接プラズマ入射法とマルチビーム型RFQ-IH線形加速器の発明が重イオン慣性核融合(HIF)に対する21世紀のブレークスルーで有ることを国際会議では発表しないできた。

日本の国産技術としてHIFの基礎研究をぜひおこなしたい。

そこで3年間はHIF研究の伝道師として国内行脚をしている。成功すれば日本でHIFの基礎研究が動き始めるであろう。

だめであれば地球一国主義者に戻って、服部は世界行脚の旅にでることになろう。

Thank you for your attention



重イオン慣性核融合(HIF)ドライバー基礎研究装置