

Study of new accelerator system using multi-beam type RFQ-IH linac with direct plasma injection scheme (DPIS) for Heavy ion Inertial Fusion (HIF) basic experiments

Toshiyuki Hattori

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama Meguro-ku Tokyo, 152-8550, Japan
E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp

Abstract

In order to verify direct plasma injection scheme (DPIS), an acceleration test was carried out using TiTech RFQ heavy ion linear accelerator and CO₂ laser heavy-ion source in 2001. The accelerated carbon beam was obtained current 10 mA of C⁴⁺. To confirm the capability of the DPIS, we designed and fabricated a new RFQ to accommodate 100mA. We succeeded to accelerate 60 mA carbon ions with the DPIS in 2004. We have studied a multi-beam type RFQ with Interdigital-H (IH) cavity that is power-efficient structure in low energy. We designed and manufactured a two-beam type RFQ-IH linac as a prototype of the multi-beam type. It had successfully to accelerate from 5keV/u to 60keV/u and 108 mA (2x54 mA/channel). We believe that acceleration techniques of DPIS and the multi-beam type RFQ-IH linac are break through of 21century for Heavy-ion Inertial confinement Fusion (HIF). Conceptual design of RF linac with these techniques for HIF is studied. New accelerator-system using these techniques for HIF basic experiment is designing to accelerate 400mA using 4 beams from an RFQ-IH type linac with DPIS. A model of 4 beams acceleration cavity was designed and manufactured for proof of principle accelerator.

重イオン慣性核融合基礎実験用直接プラズマ入射法を用いたマルチビーム型RFQ-IH型線形加速器による新型加速器システムの研究

1. はじめに

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。また電力効率の良いインターゲジタル-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型線形加速器でこの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。これは2ビームだけでなくマルチビーム加速の可能を実証したことになる。そして、100mA以上加速可能なRFQビームチャンネルを4セット挿入することで、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である。

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、我々は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ことを見いだした。

そして21世紀内にHIFのターゲット照射基礎研究でさえ無理と思えたものが十分標的に入ったと思ひ100万kW発電用ドライバーシステムとHIFのゲイン1以上の基礎研究用の加速器システムの予備的検討を行ったので、報告する。

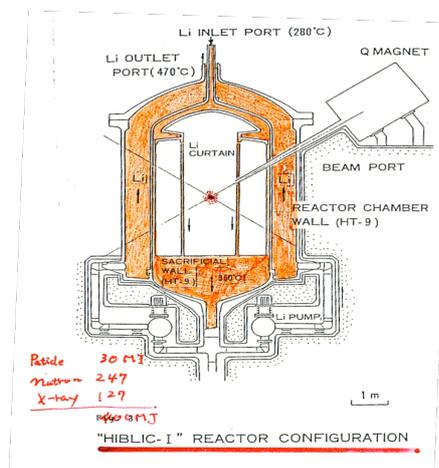


図-1 重イオン慣性核融合の原理

2. 重イオン慣性核融合について

重イオン慣性核融合 (HIF) は1970年代に米国やドイツで考え始められた慣性核融合である。HIFの原理を 図-1に示す。四方八方から重イオンビームがDTターゲットを照射し、高温になったDTプラズマを慣性力で閉じ込めロウソン条件を満たしてTD核反応を起こさせるものである。トコマック核融合のように、磁場によりDTプラズマを閉じ込めるのに対して、慣性力により閉じ込める。レーザー核融合と同じ

原理で、レーザービームに対して重イオンビームであるところが異なる。現在ゲイン10程度を目指して米国ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) がレーザー核融合の開発National Ignition Facility(NIF)を行っている。同様規模の計画がフランスでも動いている。現在の高強度のネオジガラスレーザーは高強度であるが、電力からレーザーパワーへの変換効率は0.5%以下であり、エネルギー的なブレイクイブンはゲインとして、200を必要としている。それに対してHIFは電力から重イオンビームへの変換効率は約30%で、エネルギー的なブレイクイブンはゲインとして、3で良いため商業炉としてはHIFになると思われている。100kWのHIF発電所に必要なビームパラメータを表-1に示す。

表-1 Beam Parameter

Ion species	208Pb
Total beam energy	4 MJ
Beam power	160 TW
Pulse duration	25 ns
Total beam current	10.7 kA
Ion kinetic energy	15 GeV
Number of beam	6
Radius of beam spot	3.2 mm
Target gain	100
Repetition rate	10 Hz
Beam width	0.5 ms
Beam current	400 mA

3. 1980年代20世紀の重イオン慣性核融合

(RFQ線形加速器による21世紀のブレイクスルー)

HIFは1970年代中から1980年代中までに初段入射線形加速器として、UNLAC型などの線形加速器が考えられていたが、Kapchinskii と Teplyakov により発明されたRFQ型線形加速器の有効性が1981年米国のロスアラモス国立研究所(LANL)で実証された。このRFQ線形加速器がブレイクスルーとなり、弾みが付き、特にRF線形加速器系HIFドライバーによる100万kW発電HIFプラントがドイツ、日本、ソ連で提案された。図-2に日本の100万kW発電プラントHIBLC計画を示す。日本のHIF計画にも見られる様に低エネルギーでのビーム (PbやBiで全加速電流は400mA) 収束のため、初段のRFQ型線形加速器は500mの長さで、イオン源からのビーム強度、及び低エネルギーでの空間電荷効果により大直径空洞16台の長大なシステムとなる。

しかしそれ以後は小規模なファネリングの基礎研究がLANL研で行われた後は、加速器ドライバーに関しては何も開発は進んでいない。ドイツのフランクフルト大学では 1980年代の計画の改良として、1つの空洞にシェンプ型RFQチャンネルを2個無理して入れる構造で陽子加速を試みて、初段のRFQ線形加

速器の数を半分に減らした発電プラントを発表している程度である。

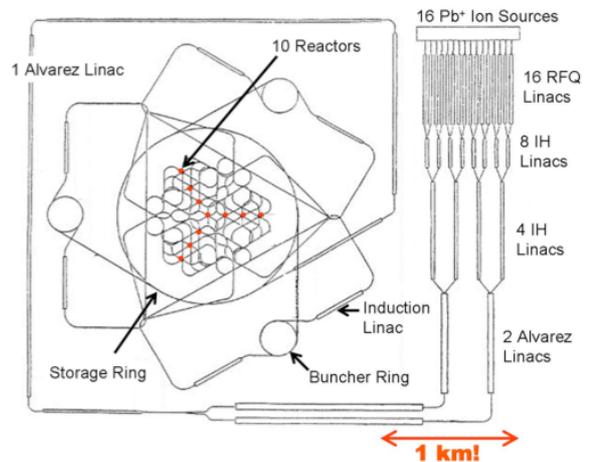


図-2 日本のHIFの100万kW発電プラントHIBLC計画

そのため20数年経過しても、ビームのバンチング、最終収束、ターゲット等のターゲット加熱の基礎的研究ですら21世紀も夢物語と思われている。

4. レーザイオン源による直接プラズマ

入射法 (低エネルギー大強度加速に対する21世紀のブレイクスルー)

レーザーイオン源から大強度ビームを初段線形加速器で加速しようとする、一般にはイオン源に加速電圧を印加しイオンを低速でRFQ線形加速器の入り口まで輸送する。しかしレーザーイオン源からの各価数のイオン電流が高いため、大きなクーロン反発力 (空間電荷効果) により、入射以前に拡がって加速することができなかった。しかし我々はレーザーイオン源から引き出す低エネルギー輸送系を無くし、レーザープラズマがイオン源から出たとたんに、RFQ線形加速器の加速電極で加速する方法 (空間電荷効果で拡がる前に加速する方法) を適用した。図-3にレーザーイオン源によるプラズマ入射法の原理を示す。

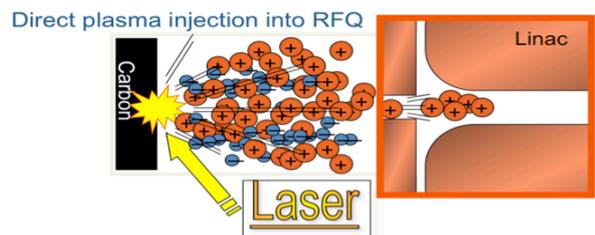


図-3 レーザイオン源によるプラズマ入射法の原理

2001年CO2レーザーで炭素4価イオンを生成し東工大重イオンRFQ線形加速器 (原理実証機) で加速する

と2.6MeV炭素4価イオンを約10mA加速することに成功した。図-4がDPIS法を原理実証した東工大RFQ線形加速器の写真である。そしてこの方法を直接プラズマ入射法 Direct Plasma Injection Scheme (DPIS)と命名し、国内外の会議に発表したがだれも理解せず、反響も無かった。そこで、現在米国ブルックヘブン研の岡村君と100mA加速のRFQ線形加速器を計画、設計し、フランクフルト大学に4ロッド型RFQ線形加速器を製作させて、50%ずつ支払った。このテスト機でCO2レーザーイオン源からの炭素4価イオン1.2MeVに60mAとYAGレーザーで炭素6価イオン18mA加速することに成功した。図-5が炭素60mA加速に成功した加速テスト機の写真である。図-6が加速電流スペクトル。国内外で発表し大きな反響があった。大強度加速にブレークスルーが生まれ、最も象徴的HIFドライバーやすぐ即可能な炭素6価加速がん治療入射線形加速器への利用を国内外の学会で発表した。

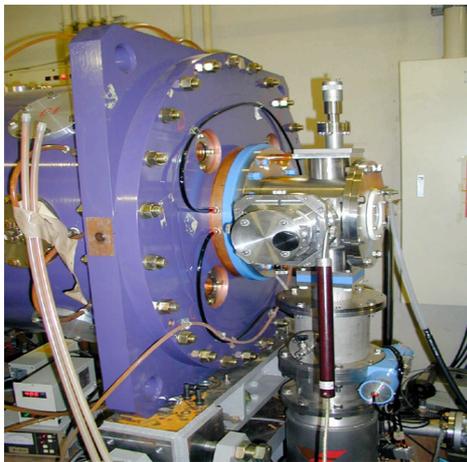


図-4 DPIS法を原理実証した東工大RFQ線形加速器 (RFQの入射側にレーザーイオン源が直結)

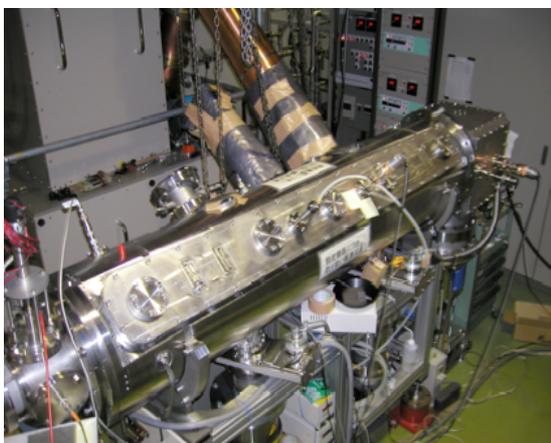


図-5 炭素4価を60mA加速に成功した加速テスト機 (右側がレーザーイオン源で、手前に加速される)

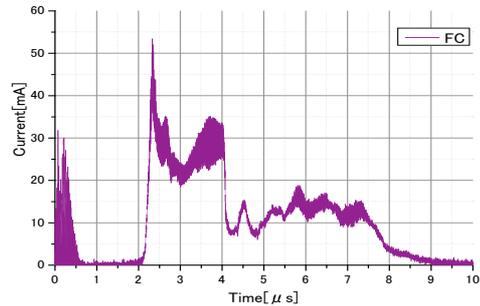


図-6 レーザイオン源からの炭素4価イオンをDPIS法で加速した時の加速電流

5. マルチビーム加速RFQ-IH型線形加速器

(16台のマルチビームに対する

21世紀のブレークスルー)

電力効率の良いInterdigital H(IH)型加速空洞に Radio Frequency Quadrupole (RFQ) 加速構造を挿入した線形加速器を開発した。この構造はRFQチャンネルを幾つか挿入可能であるので、HIFドライバーには都合が良い。図-7に2ビーム、4ビームの例を示す。2005年からマルチビーム加速の原理実証機として、2ビームRFQ-IH型線形加速器の研究を開始した。

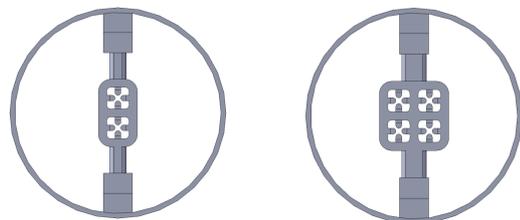


図-7 2,4ビームのIH空洞内のRFQチャンネル例

2ビームRFQ-IH型線形加速器

この研究は博士課程の石橋君の博士研究として行われた。東工大に建設された世界最大のIH線形加速器のCW80kW高周波電源を使って加速することを考えた。パワーを考慮して、2ビームによるRFQ-IH型線形加速器を開発することを決定した。

レーザーイオン源はレーザー光をスプリッターで2分割するのを方式で製作し、発生する2ビーム強度差は1-3%であった。図-7に有るような二段重ねの構造にした。2ビームはマルチビーム方式のための原理実証機を意味している。

軌道はRFQUICKとPARMTEQMによりシミュレーションを行った。またこの複雑なRFQ-IH空洞はMW-Studio

で3次元高周波電磁場シミュレーションを行い設計した。それらの検討より2ビームRFQ-IH型線形加速器のメインパラメータを表-2に示す。



図-8 2ビーム型RFQ-IH型線形加速器の構造

表-2

Main parameters of the 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

イオン源試験後、2ビームRFQ-IH型線形加速器にイオン源を結合し、高周波電力を空洞に入力して、各種の基礎実験を行った。イオン源を結合したRFQ-IH型線形加速器の写真を図-11に示す。



図-9 2ビーム型 RFQ-IH型線形加速器の写真
(右下が2ビーム型レーザーイオン源で左上に静電アナライザーとFCが設置され電荷と電流分析を行う)

炭素2価の加速試験の結果、空洞の銅表面のQ値は予想より良く80%であった。ビームに多くの電力パワーを入力出来たために、1チャンネル当たり54mA即ち2チャンネルで108mA加速することに成功した。その加速電流の2チャンネルのスペクトルを図-9に示す。

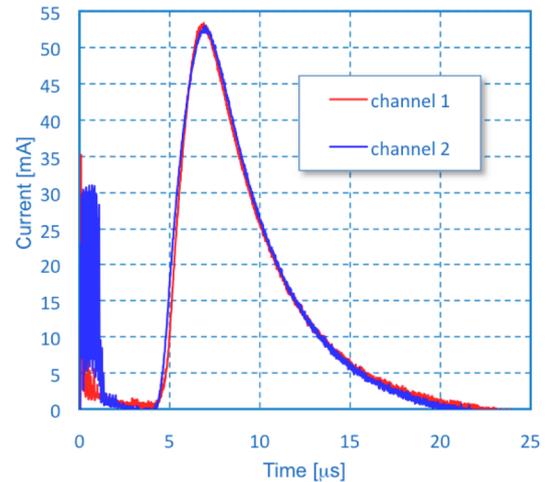


図-10 チャンネル1と2の電流量表示 (1、2チャンネルの8ショットの重ね合いの差は1-3%以内である)

これらのデータからレーザーイオン源を使用したDPIS法による低エネルギーの大強度加速はHIFのドライバーとして最適であり、我々は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ことを実証した。

6. HIFドライバーにおける21世紀のブレークスルーの意義とその後にくる問題

2つの低エネルギー大強度重イオンの加速技術の発展は1980年代初期のRFQ線形加速器発明に対するブレークスルーと対応することができ、21世紀のブレークスルーと言えるであろう。すなわちこのDPIS法とマルチビームRFQ-IH型線形加速器1台の線形加速器でPbまたはBiを400mA加速が可能であり、HIF計画の筋書き通りに商業炉が運転できることになる。そして21世紀内にHIFのターゲット照射基礎研究でさえ無理と思えたものが十分標的に入ったと思った。しかしビームバンチング、最終収束、ターゲット加熱の問題は未検証である。そのため規模を縮めたシステムに於いて基礎的研究を展開する必要がある。

これらの研究成果のデータ、技術はすでに多くの国際会議、国際ジャーナル誌に発表済みである。このDPIS法とマルチビームRFQ-IH型線形加速器の真の意義を一度理解すれば欧米グループに先を越される可能性が有る。21世紀の2つのブレークスルー技術は日本で発明された我々の技術であり、ぜひその前に日本で完成させる必要がある。

7. 大強度加速器技術開発研究と核融合 基礎研究における不平衡性に付いて

7.1 大強度加速器技術開発研究

加速器技術において、電子の大強度加速の研究は世界的研究として、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)で高額予算の研究が進められている。

またイオンの最も軽い陽子の大強度加速は東海村のJ-PARCから始まり大きな予算規模で行われている。

これに引き替え重イオン加速への予算的支援はゼロに等しい、その意味でも非常に片手落ちであり平衡性に欠けている。そして、日本のHIF計画を提案したのは1983年であり、二十数年を経過し、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減んでしまうことを意味する。

7.2 核融合基礎研究

核融合研究には磁場閉じ込め型核融合に、日本政府はJT-60やITER計画の基礎研究に、それぞれ数千億円を支援している。

一方慣性閉じ込め型核融合のレーザ核融合には百数十億円程度の研究支援である。米国、フランスは軍事研究がらみで、数千億円を支援している。慣性核融合は現在レーザの発振効率が悪く、実際の商業炉になるのはHIFと考えられている。

7.3 HIF研究の必要性

磁場核融合のトカマック型に対して、オルタネイティブとして日本ではヘリカル型に千数百億円程度が支援され国立研究所が作られて基礎研究が行われている。それに引き替え慣性核融合の最終的本命と目されるHIF研究への支援はゼロに等しい。これは大きな矛盾であり平衡性に欠けるものである。

どこに問題が有るのか、無いのかさえ解明されていない。そのため、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たことにより、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い、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。

8. 新ブレークスルーに基づく21世紀の 100万kW発電プラントの新デザイン

2つのブレークスルー用いた重イオン慣性核融合における入射線形加速器の研究を、修士の小堀君に軌道計算等をしてもらった。全体ドライバーを図-11に、概略を以下に述べる。

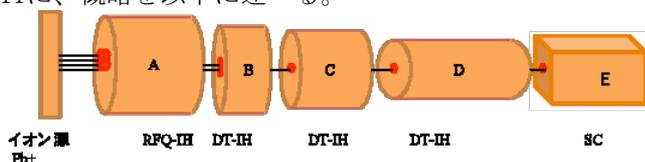


図-11 新HIFの100万kW発電プラントの
ドライバー線形加速器の配置

各装置の特性を以下に述べる。

1. 4 ビームレーザイオン源 1 台
2. 4 ビーム型 RFQ-IH 型線形加速器 1 台
(10MHz空洞で300keV/uまで115mA/ch加速)
3. 2 ビーム DT-IH 型線形加速器 1 台
(20MHz空洞で1.2MeV/uまで220mA/ch加速)
4. 1 ビーム型 DT-IH 型線形加速器 1 台
(40MHz空洞で4.7MeV/uまで400mA加速)
5. 1 ビーム型 DT-IH 線形加速器 1 台
(80MHz空洞で4.7MeV/uまで400mA加速)
6. 1 ビーム型超伝導(SC)型線形加速器 1 台
(160MHz空洞で50MeV/uまで400mA加速)

線形加速器だけの全長は2620mで、予備的結果である。

9. まとめ

1980年代の20世紀のブレークスルーすなわちRFQ型線形加速器の発明が各国の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。21世紀のHIFへの2つブレークスルー技術を発明したのは日本の大学の1研究室で、世界にイニシアチブを取ってさらに日本で進めるべきものであろう。7章に述べたように日本には大強度重イオン加速器の研究所は存在せず、また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。21世紀のブレークスルーである直接プラズマ入射法とマルチビーム型RFQ-IH線形加速器の真の意義を欧米の重イオン加速研究所が理解すれば、欧米に先をこ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る。そしてしばらくして日本に逆輸入され2番、3番煎じとして、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ろう。

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である。真の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待たないであろう。これまでの研究支援環境で成果を上げ最後に会議員と成った人々にそれを要求するのもまた酷であろう。日本の研究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ある。