

重イオン慣性核融合用多ビーム加速 IH-RFQ 型線形加速器 (1)

服部 俊幸^{A)}、柏木 啓次^{A)}、山本 和夫^{A)}、林崎 規託^{A)}、高野 淳平^{A)}、高橋 康之^{A)}、畑 寿起^{A)}、
青木 学^{A)}、土屋 和利^{A)}、長江 大輔^{A)}、岡村 昌宏^{B)}、

^{A)} 東京工業大学原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{B)} 理化学研究所

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

概要

東工大、理研との共同研究で、直接プラズマ入射重イオン源による RFQ 型加速器での大強度加速を実験的に発見した。これを重イオン慣性核融合のドライバーに利用することを検討した。POP 加速器として、PARMTEQ プログラムで軌道計算をおこない、2keV/u から 25keV/u まで 25mA 加速する RFQ チャンネルを設計した。この 4 チャンネルを格段に電力効率の良い IH 型加速空洞に結合して IH-RFQ 型線形加速器を設計した。4 ビームレーザーイオン源を動作して、400mA のビームを加速するシステムを検討した。この直接プラズマ入射加速法による IH-RFQ 型線形加速器が重イオン慣性核融合の RF 加速器ドライバーとして、非常に有望であることが分かった。

1 . はじめに

東工大 RFQ 重イオン線形加速器と理研の CO₂ レーザーイオン源を組み合わせて、直接プラズマ入射による RFQ 線形加速器の粒子加速試験を行っている。そして RFQ 線形加速器の加速デザイン値である、すなわち PARMTEQ プログラムによる計算結果よりも 10 倍程度のビームを加速することに成功した。

分析磁石による加速イオンの分析、運動量と時間の測定を行い、デザイン値の数倍から 10 倍程度を加速できることが明確になった (1-4)。そこでこの直接プラズマ入射方式を RFQ 型線形加速器に応用すれば、デザイン値の最大加速電流値の数倍から 10 倍の粒子を収束加速することが可能である。

この事実を利用した応用は沢山考えられるが、大強度重イオン加速の象徴として、重イオン慣性核融合 (HIF) に適用すると画期的な低エネルギー領域のドライバーが考えられる。HIF ドライバーへの適用及び、この原理を実証するための加速器システムについて以下に述べる。

2 . 直接入射法による HIF-RFQ ドライバー

例えば日本の 100 万 kW 発電 HIF プログラム “HIBLIC” 計画 5) を図-1 に示す。

HIBLIC では、Pb⁺イオン 35mA を加速する RFQ 線形加速器が 16 台必要としている。しかしこの直接入射方式を採用すれば (デザイン値の 4 倍が可能とすれば) 1 台で 140mA、4 台で FIH の 100 万 kW 発電プラントに必要なビーム量 520mA を十分加速することが可能となる。

さらに東工大と理研が検討しているマルチビーム加速 IH-RFQ 型線形加速器 6) を使用すれば、4 つの RFQ チャンネルを持った IH-RFQ 線形加速器 1 台で HIF ドライバーの低エネルギー領域をカバーできることになる。さらに服部等に提案 7) されている IH 型高加速率線形加速器をこの RFQ 線形加速器の後に採用すれば、高周波 (RF) 加速器ドライバーによる重イオン慣性核融合の可能性が非常に大きく成ったことを意味している。すなわち全長が 10km を必要とした RF 線形加速器が 1.5km 以内の小型のプラントに成ることである。

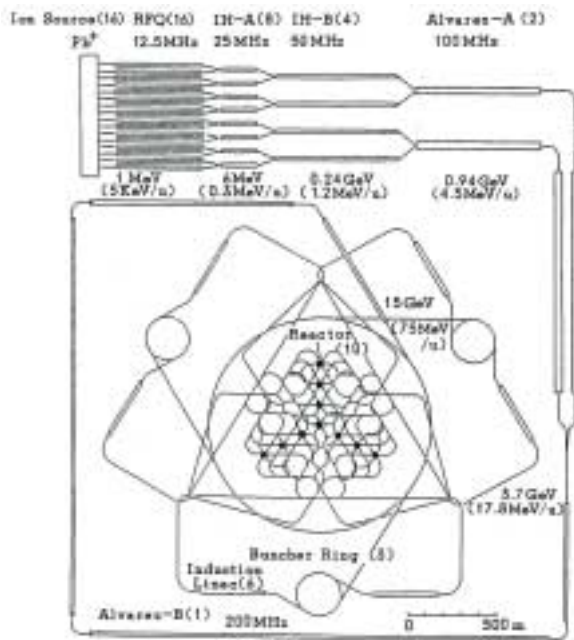


図-1 HIBLIC の計画図

3 . 直接入射 4 ビーム加速実証機概念設計

100 万 kW 発電プラント (HIBLIC) の直接入射原理による初段を考えた。4 ビーム加速を考えると Pb⁺ イオンを RFQ チャンネル 1 本ごとに 130mA を加速し 4 本で 520mA 加速することになる。参考文献 5) によれば核子当たり (E/A) 180keV (180keV/u) まで加速する RFQ 加速器は 100m の長さが有る。これと同じ性能の 4 ビーム IH-RFQ 型線形加速器を考えると、加速電圧は 42.5MV で 1 台の加速器で 520mA を加速し、ビームロス電力は 22MW となる。長さは RFQ 型で有るのでやはり、100m 必要となる。

そこで加速エネルギー、加速粒子の質量も数分の 1 に下げた原理実証機 (POP) を検討した。入射は核子当たり 2keV/u で、加速実証が可能な 25keV/u 出射を考えた。粒子の質量数は IH-RFQ 型加速器の全長とレーザ 1 価イオン源の特性を考えて、40 程度とし 2~3m とすることにした。質量数 40 は ⁴⁰Ca や ³²S、また服部グループでは 4 ビーム ECR イオン源 (6,8) で ⁴⁰Ar の発生を計画しているが、レーザイオン源による直接入射と従来型の RFQ 入射を比較出来ることを考慮した。

4 . 原理実証機(POP)の軌道計算

価数対質量の比 1/40 以上のイオンを核子当たり 2keV/u 入射で 25keV/u 出射する RFQ チャンネルを検討した。PARMTEQ プログラムによる一般的粒子シミュレーションを行った。そして計算の結果全長 2.5

m で価数対質量の比 1/40 の粒子を 25mA 加速できる解を得た。粒子運動の計算結果を図-2 に示す。図-2 の上 2 つが軌道セルに沿った横方向の粒子の縦横の広がりである。下 2 つはそれぞれ DC ビームで入射した粒子の位相運動とそのエネルギーの広がりを示している。

Table-1 Main parameters of 4 beams IH-RFQ Linac

Charge to mass ratio	1/40
Operation frequency(MHz)	40
Input energy(keV/u)	2
Output energy(keV/u)	25
Normalized emittance(mmmrad)	0.5
Vane length(cm)	252
Total number of cell	233
Synchronous phase	-90 ° -30 °
Beam intensity (mA) and Number	400(100x4)
Beam loss power (kW)	400
Wall loss power (kW)	80
RF Power (kW)	500

計算された 25mA を加速する RFQ チャンネルの主要パラメータを表-1 に示す。

この軌道計算により q/A = 1/40 以上の粒子を 25mA 加速できる RFQ チャンネルを使用して、レーザイオン源により 1 価イオンが十分に生成できれば、直接入射方式により 1 チャンネル 100mA 以上を加速することができる。

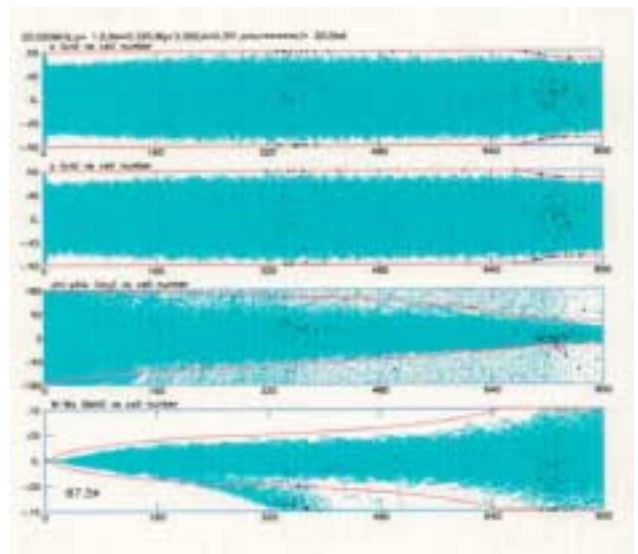


図-2 粒子運動の計算結果

5 . 原理実証機(POP)

IH-RFQ 型 6) 線形加速器は加速電力効率の格段に良い IH 型加速空洞共振器に、低エネルギーから大強度でビーム加速できる RFQ チャンネルを多数取り付け構造である。この IH 型加速空洞に、1 チャンネルの RFQ 構造を付けた IH-RFQ 型線形加速器はドイツ GSI 研究所で Ratzinger⁹⁾ 等により建設され、加速に成功している。

IH 型線形加速器は低、中エネルギー領域で、加速電力効率が他の線形加速器に比較して 5~20 倍高いことが知られており、重イオン慣性核融合用の RF 線形加速器には IH 型加速空洞を採用して、省エネルギー化をする必要がある。

共振周波数 40MHz の IH 型加速空洞に 4 チャンネルの RFQ ベーン電極を挿入し、空洞のリッジからのシステムに交互のベーン電極がコンタクトして電極に正負の高周波電圧を発生する。

直接入射のレーザーイオン源はターゲットとして、C, S や Ca の固体ターゲットを予定している。YAG レーザの 2 倍高調波光をスプリターで 4 ビームに別け、それぞれ水平外側方向から加速ベーン電極の前にセットされているターゲットを照射する。そして 1 価イオンの発生量が十分であれば、PARMTEQ の計算値 25mA の 4 倍 100mA を 25keV/u まで加速する。POP 機の主要パラメータを表-1 に示す。

6 . 原理実証機建設の問題点

実際に 400mA を加速すると、ビームの高周波ロスは 400kW 以上に達する。加速電圧を発生するための加速空洞のウォールロスは五分の一の 80kW 程度と思われる。加速電極の電界はキルパトリック限界の 1.8 倍程度に押さえているが、ビームの RF ロスを考慮して 400 から 500kW のパワーを投入すると、更に 2 倍以上の電圧が掛かり放電を起してしまうであろう。そのために、ビームロスの間のみ 400kW を投入する回路系を付加することでこの問題を解決する必要がある。それで問題が解決しない場合は加速電圧の低い RFQ チャンネルを再設計する必要が出てこよう。その場合は 5m 以上の長い線形加速器になるであろう。以上のことを考えると、東工大の重イオン RFQ 線形加速器と理研のレーザー重イオン源を結合して、炭素イオンで直接プラズマ入射加速実験が出来たことは非常な幸運に恵まれていたと言わざるを得ない。

7 . 4 ビーム線形加速器の基礎モデル空洞

製造コスト、電極の交換性を考えて、加速電極はベーン型でなく、4 ロッド型を検討した。4 ビーム加速 IH-RFQ 型線形加速器の空洞は IH 型空洞として

は等速モデルに相当し、前後対称な比較的簡単な高周波空洞となる。しかし RF 容量が 4 ロッド以外にロッドセット電極間にも有り、それがまた 4 チャンネルあることで、可成り複雑である。



図-3 仮組み中のロッドと電極の写真

そこで 3 次元プログラム MAFIA-4 や OPERA でシミュレーションを行うとともに、プログラムコードの妥当性をチェックするために等倍の真鍮モデルを既存の真鍮モデルを改造して現在製作中である。図-3 に 4 ロッド 4 チャンネルを固定する電極とロッドの写真を示す。モデル製作後各種高周波特性を測定報告する予定である。

8 . まとめ

東工大、理研との共同研究で、直接プラズマ入射重イオン源による RFQ 型加速器での大強度加速を実験的に発見した。まだ詳細は説明できないが、これは明確な事実であり、これを重イオン慣性核融合のドライバーに利用することを検討した。

PARMTEQ プログラムで軌道計算をおこない、 q/A 比 1/40 以上の粒子を 2keV/u から 25keV/u まで 25mA 加速する RFQ チャンネルを設計した。この 4 チャンネルを格段に電力効率の良い IH 型加速空洞に結合して IH-RFQ 型線形加速器を設計した。4 ビームレーザーからのレーザー光によりレーザーイオン源を動作して、400mA のビームを加速するシステムが完成するであ

ろう。しかし色々な問題もあるであろう。

以上より、この直接プラズマ入射加速法による IH-RFQ 型線形加速器が重イオン慣性核融合の RF 加速器ドライバーとして、非常に有望であることが分かった。現在基礎モデルを製作中である。

参考文献

- 1) M.Okamura, T.Katayama, T.Takeuchi, T.Hattori and N.Hayashizaki, Proc. 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, 26(2001)76-78
- 2) M.Okamura, T.Takeuchi, T.Hattori and T.Katayama, Abst. 7th European Conf. on Accelerators in Applied Research and Technology, 21st-24th August 2001 Guilford, UK (2001)O14
- 3) M.Okamura, T.Takeuchi, T.Katayama, T.Hattori, Reviv of Scientific Instruments, 73(2002)761-763
- 4) T.Takeuchi, T.Katayama, M.Okamura, K.Yano, A.Sakumi, T.Hattori, Reviv of Scientific Instruments, 73(2002)764-766
- 5) Y.Fujiie, S.Hayakawa, T.Hattori, Y.Hirao, T.Katayama, A.Noda, H.Obayashi, S.Yamada, et.al., Research Report Instiute of Plasma Physics Nagoya University, HIBLIC-heavy ion fusion reactor, Rep. IPPJ-663(1984)
- 6) T.Hattori, H.Kashiwagi and M.Okamura, Proc. 5th Japan-US Workshop on Physics and Engineering of Heavy Ion Inertial Fusion, 5(2000)105-114
- 7) T.Hattori, M.Okamura, N.Hayashizaki, et.al., Fusion Engineering and Design, 32-33(1996) 359-396
- 8) H.Kashiwagi, T.Hattori, M.Okamura, Y.Takahashi, T.Hata, Abst. 7th European Conf. on Accelerators in Applied Research and Technology, 21st-24th August 2001 Guilford, UK (2001)P07
- 9) U.Ratzinger, K.Kaspar, E.Malwitz, S.Mineaer and R.Tiede, Nucl. Inst. and Meth., A415(1998)281-286