

直接プラズマ入射法を用いた重イオン慣性核融合における 入射線形加速器のデザイン

東工大理工(院) ○小堀 壘 東工大原子炉研 服部 俊幸
東工大原子炉研 林崎 規託 日大生産工 中西 哲也

1.はじめに

近年, 原子力に代わる核融合を実現するため, 慣性閉じ込め方式による核融合研究が進んでいる. 慣性閉じ込め核融合にとっての課題として, 適当なドライバ系を開発することである. ドライバは電力を使用し光または粒子のビームを発生させ, それによってターゲットを圧縮し加熱するものである. そのターゲットが核融合反応を起こし, それを電力にした後, その一部を使ってドライバを作動させる. したがって, ドライバとターゲット圧縮段階の効率が極めて重要な問題である¹⁾.

本研究では, 東京工業大学で開発されたレーザーイオン源を持った直接プラズマ入射法(Direct Plasma Injection Scheme, DPIS)を用いて新しい重イオン慣性核融合の高周波加速器システムを研究する. 特に, 従来の日本の計画, Heavy Ion Beam and Lithium Curtain (HIBLIC)を参考に加速器システムの構築を行う.

2. 重イオン慣性核融合

慣性核融合(Inertial Confinement Fusion, ICF)は, レーザ光あるいは粒子ビームを標的(ペレット)に照射して, ペレット内部に含まれる燃料の熱核融合反応(重水素と三重水素など)を起こさせる方法である. 慣性核融合では, ペレット(pellet)と呼ばれる小球内に重水素等の燃料物質を充てんしたものを作成し, 四方八方から瞬間的に大量のエネルギーをペレットに注入し, 急激に圧縮加熱を行って核融合を起こすという反応である. この際, これらの燃料がプラズマ状態となり, そのプラズマ温度が, 原子核がたがいに量子効果により衝突して核反応を起こすのに十分なほど高い状態に保たれる必要がある. 本研究では, 重イオンの一つである鉛イオンを用いて, 重イオン慣性核融合におけるドライバ線形加速器に注目する¹⁾.

3. 直接プラズマ入射法(Direct Plasma Injection Scheme, DPIS)

DPISは, 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, 数10mA以上の大強度ビーム加速を可能とする方法である. このとき, レーザーイオン源は従来型と同じく高電圧ターミナル上にあ

るが, 加速器入射部まで同電位となっているため, 重イオンビームはレーザープラズマの膨張速度を利用して, プラズマ状態を維持したままRFQ線形加速器まで輸送される.

従って, この方法を用いれば, これまで低エネルギービーム輸送系で問題になってきた空間電荷効果によるビーム発散の影響が少ないため, 重イオン慣性核融合装置や重イオン癌治療装置に有効である²⁾.

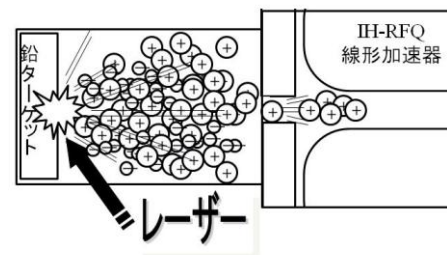


Fig. 1 イオン発生断面図

4. Heavy Ion Beam and Lithium Curtain (HIBLIC) プラント計画と特徴

重イオン慣性核融合の計画として日本のHIBLIC計画(1984年)がある. HIBLICでは, Pb+イオンを35mV加速するRFQ線形加速器を16台使用している. しかし, 直接プラズマ入射法を採用すれば1ビームで150mA, 4ビームで520mA加速することが可能である.

ここで, 東京工業大学で提案されているIH高加速率線形加速器をRFQ線形加速器の後に採用すれば1ビームで150mA, 4ビームで520mA加速することが可能であり, 重イオン慣性核融合のドライバ線形加速器の小型化が実現する可能性が高い³⁾.

5. 4ビーム加速器システム

本研究で扱う加速器システムとして, DPISを用いて入射した重イオンを4ビームRFQ-IH線形加速器に入射し, ファネリングにより, 出射粒子を制御し, 2ビームIH-ドリフトチューブ加速器に入射させる. さらにファネリングを利用し, 1ビームIH-ドリフトチューブ加速器に入射し, 徐々に加速させていく. この方法を連続して使用することよ

Design of Linear Accelerator using Direct Plasma Injection Scheme
for Heavy Ion Inertial Confinement Fusion

Rui KOBORI, Toshiyuki HATTORI, Noriyasu HAYASHIZAKI and
Tetsuya NAKANISHI

り,大強度の重イオンビームを1台の線形加速器で効率よく加速することが可能となる。

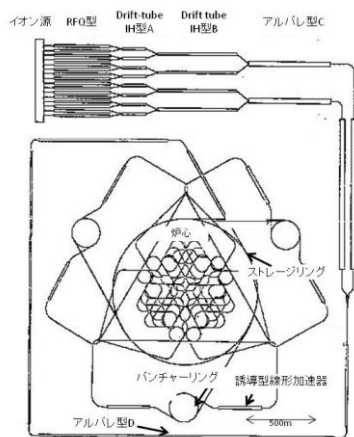


Fig.2 HIBLICプラントのレイアウト

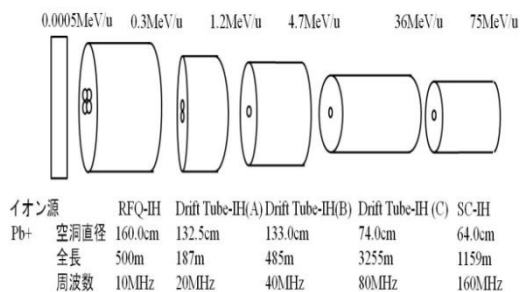


Fig.3 DPISを用いたドライバ線形加速器の全体

6. ドライバ-加速器の概念設計結果

DPISを用いた慣性核融合ドライバ-加速器概念設計の結果をTable1に示す。

空洞直径などの算出は東京工業大学Drift Tube-Inter digital-H(IH)型線形加速器(空洞直径140cm,周波数48.5MHz,1ビーム)及び製作中の2ビーム RFQ-IH型線形加速器(空洞直径49.2cm,周波数46.2MHz)⁴⁾を参考にして設計した。なお,ギャップ長はセル長の3分の1,ドリフトチューブ長はセル長の3分の2とした。ここで,DT-IHはドリフトチューブ型線形加速器,SC-IHは超電導IH型線形加速器である。

Table1 加速器設計概念結果

加速器構成	RFQ-IH	DT-IH(A)	DT-IH(B)	DT-IH(C)	SL-IH	出射
エネルギー(MeV/u)	0.0005	0.3	1.2	4.7	36	75
周波数(MHz)	10	20	40	80	160	-
電流(mA)	150	270	520	520	520	-
ビーム数	4	2	2	1	1	-
加速位相(度)	-90~-45	-40	-40	-35	-30	-
加速効率(MV/m)	0.12	1.0	1.5	2.0	7.0	-
加速電圧(MV)	62	187	728	6510	8112	-
全長(m)	500	187	485	3255	1159	-
セル数	-	656	1702	9300	3862	-
空洞直径(cm)	160.0	132.5	133.0	74.0	64.0	-

7. ビーム軌道シミュレーション

HIBLICプラント計画の設計として,IH型加速器においてPERMILAソフトを採用し,Table1で示す条件をもとに,ビーム軌道シミュレーションを実行する。このソフトは,アメリカのLos Alamos

国立研究所で開発され,空間電荷効果の影響を考慮できるビーム軌道シミュレーションソフトである。このため,低エネルギー領域のシミュレーションにおいて非常に効果的である。ここでは,空間電荷の効果 considering,DT-IH型線形加速器においてビーム数10000個の粒子を電圧250kVから3MVまで加速した時の到達ビーム数の様子をFig.4に表す。

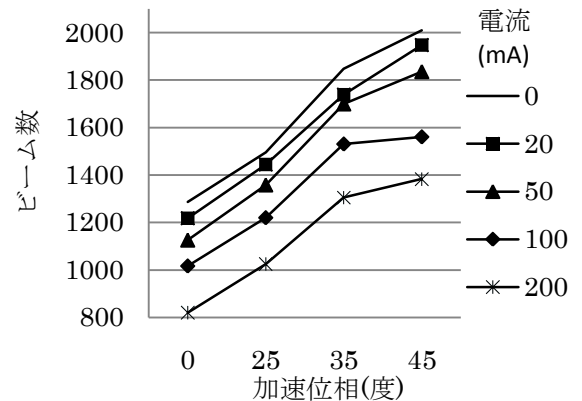


Fig.4 最終セルでの加速量の様子

ここで,電流が増加すると空間電荷により発散し,加速量が減少することが分かる。

8. まとめと今後の予定

今回は,ドライバ線形加速器システムの概念設計およびIH型線形加速器における粒子軌道シミュレーションを行った。結果より,PERMILAソフトでのDT-IH型線形加速器での粒子軌道シミュレーションは有効であることが示せた。

今後は,IH型のRFQ及びDT線形加速器における粒子軌道および加速空洞のシミュレーションをPERAMTEC, PARMILA, Micro Wave Studioソフトを用い,エネルギーを上げて実行し,個々の線形加速器の設計を行い,そのシステムの適合性について研究する。

参考文献

- 1) G. マックラッケン, P. ストット, フュージョン-宇宙のエネルギー-, (2005), シュプリングー・フェアーク東京, pp173~177
- 2) 柏木啓次, RFQ線形加速器への直接プラズマ入射による大強度重イオン加速に関する研究, 東京工業大学博士論文, (1996), pp11~13
- 3) Y. Fujii-e, Y. Hirao, T. Hattori et al, Heavy Ion Fusion Reactor "HIBLIC-I" Conceptual Design on Heavy Ion Fusion Reactor, the Working Group on "HIBLIC-I" Research Information Center Institute of Plasma Physics Center, (1984), ppI-1~IV-25,
- 4) 石橋拓弥, 低エネルギーマルチビーム型IH-RFQの設計, 東京工業大学修士論文, (2007), pp58~60