

加速器研究に関連した核融合技術

名大 プラズマ研 宮原 昭

核融合研究は最近のエネルギー危機と共に将来のエネルギーの切り手として着目され、研究の促進が期待されているが、その装置や実験の道具立てには加速器研究と関連したところが極めて多い。このような場合、相互の領域の研究者が必要な技術開発などで協力することのほうがましいことであろう。ここではその意味で加速器研究に関連が深いと思われる核融合技術を二三紹介する。

加速器研究に関連深い核融合技術は大きく分類すると以下の如くであろう。この場合核融合技術といっても、核融合の研究段階に必要な技術と、核融合の基礎的段階のあとの、いわゆる炉技術との二つがあることは注意しておく必要がある。

I. 技術的にゆらひが類似のもの

超高真空技術
超伝導コイル
超伝導空間共振器
大電力高周波電源
イオン線
磁場電源

II. 加速器とを用いている核融合技術

中性粒子ビーム入射
燃料注入
核融合炉壁損傷の研究
電子ビーム核融合

III. Collective Phenomena をを用いた加速器

Electron Ring Accelerator
Hipac
波動や不安定性の利用
誘導効果の利用
衝突加速

才1表 加速器研究に関連した核融合技術の分類

I. 技術的にゆらひが類似のもの

1.1 超高真空技術 現在核融合研究において超高真空が要求されているのは、中性粒子(c)や電子(e)さらには中性のDやHがプラズマに混入してエネルギー損失を増大せしめるのを避ける

ためである。この場合CやOは真空容器の SUS304L タイニコネルの表面からの脱ガスと考えられている。放射損大には原子番号の大きいFeやWの混入の方が問題となるが、これら日超高温技術によって改善されるというよりも予備電炉や予備加熱時のプラズマの安定性にかゝることも多い。その意味で核融合研究で超高温を必要とするのは、容器表面からの不純物の混入とせらることを中心に考える。この意味では Storage Ring の超高温と同じ要求である。そのための方向として壁の Baking, Discharge Cleaning, 材料の選擇などを研究している。カトリックマク装置などでは容器の外側Kコイルが張りあつてあり、Baking が自由に出来ぬ場合などもあり、多くの研究所では脱ガスを Discharge Cleaning に代わっているところが多い。フランスのフオンチネ・オ・ローヌ研究所のカトリック⁽¹⁾はじめて400°Cで Baking し、さらに Discharge Cleaning を行った装置であるが、これでも CやOを全量的に定量すると10%前後も混入しているのだ。どこからくるかは今後の問題である。中核より減少させるためには排気速度を大きくする必要がある。というよりも真空容器壁そのものがポリアになっていることの方が大きい。

1.2 超伝導コイル 核融合炉においてはエネルギーバランスが本質的であるので、効率のよい加速器を伴う超伝導コイルは本質的である。この場合プラズマ閉じこめ磁場は5T程度が予想されているが、線材のラゲル最大経路磁場は10Tと考えることが予想される。そのためには金属化合物材料が必要となるであろう。この方向は加速器と類似である。さらに核融合炉の場合炉心から発生する中性子による照射が大問題である。これはγ線は放射、安定化剤、ヘリウムの放射線損傷の問題であり、もう一つは中性子による蒸発の問題である。ブランクettによる減速を 10^6 とすると5MW程度の熱がマグネットに伝わることになるが、冷凍加速器の効率を $1/500 \sim 1/1000$ とすると5MW程度のエネルギー消費となる。

1.3 超伝導電磁気推進 核融合炉の一つの型としてカスプ配置のプラズマ容器のラインおよびポイントカスプ部をイオニクイクロトロン共鳴周波数の高周波電場とレジコメという考えがあり、プラズマ研究所でRFC(Radio Frequency Confinement)という名で研究されている。この場合に10kV程度の核融合プラズマを断熱的にレジコメする際には強い電場が必要となり、高いQ値の空胴共振器をもちたいと、このエネルギー損失が大きくて妙として成立しない。そのための考察がおこなわれているが、直接炉心プラズマに面しているところでもあり、困難が多い。

1.4 大出力高周波電源 核融合研究の現在の焦点は加熱である。そしてこれは核融合炉のパラメーターではイグナイターとしての役割を果す。現在のところ加熱手段として高周波加熱とレーザー加熱、断熱圧縮などが考えられる。高周波加熱ではLow Hybrid加熱が有望視されているが、研究段階で1GHz, 1MW 1秒定格、炉の段階で1GHz, 10MW 10秒定格程度のもが必要となる。現在は50kW CWのクライストロンを並列運転して200kW程度をえているが、将来は一本で数百乃至は1MW CWのもが必要となる。これはUHF TV 帯の大出力化の需要と相俟って200kW程度までは容易に開発出来ようであるが、それを越えての大出力化には独自の開発が必要となる。この場合 Storage Ring 用の高周波共振器との共同開発は魅力がある。以下に核融合研究用のクライストロン(UHF TV 帯の流用)の例と Storage Ring 用共振器の特性例を示す。

NEC 1AV99 698MHz ~ 890MHz CW 27kW S.S.A. Collector Dis. 140kW Out Ant Power ~60kW

1.5 イオン源 核融合研究にもちこむイオン源としては第一に中性ビーム入射に適用のイオン源がある。これは装置のアフセプトランスによって規模が決まってくるが、通常10~20A程度である。ビームの進行度や半径の制限もアフセプトランスから要求されるので、イオン源の研究は極めて重要である。放電管中のプラスマの安定性とひき出しビームとの関連を詳しくしらべられているのも最近のことである。(5)(6) 中性子源としての要求から1EA~20kAのイオンソースも話題になっている。さらにイオンビームを中性粒子ビームにするための効率のよいことからH⁻などのネガティブイオン源の研究も最近急速に進んで来た。核融合炉の研究の一環として炉壁物質のイオンビームの生成も手がつけられはじめられている。これらのイオン源の研究が加速器科学と密接に関連していることはいまでもあるまい。

1.6 磁場電源 核融合研究装置もシンクロトロンも強磁場をもちこむことは共通しているが、核融合装置の磁場は殆どが空芯コイルであること、シンクロトロンの現在のものは鉄心入りが多いこと、しかもアフセプトランスの巻数(4/R値)空芯コイルでは1~10秒であり、シンクロトロンでは10²~10⁴秒で4倍値よりもむしろ日値であらばより方が直観的である点などが大きなちがひがある。また線径なしも核融合装置では中大型トカマクで数分から数時間にとどまるに反し、シンクロトロンでは0.1~数マイクロメートルのものが多し。磁場電源もこれに対応してフライホイール発電機発電機では核融合用では蓄のベアリング損や風損に抗しうる限りで割合小さな誘導電動機を駆動モーターとしてもち、シンクロトロン用は平均電力に見合う比較的大型のものを利用してゐる。しかしDuty Cycleのことを特別にすると核融合の研究も磁場のフィードバック制御やプログラムが必要になるので速い応答をもつことが要求されて来た。従来の磁場電源は直球買電と連続されたSCR電流が多いのもそのためである。

II 加速器を応用している核融合技術

2.1 中性粒子ビーム入射 中性^{粒子}ビーム入射は加熱方法としてもつとも有望であると考えられている。イオン源から引去られたイオンビームは加速された中性化されてトカマクなどに入射されるが、大型トカマクで100~200keV、核融合炉で1MeV程度まで加速する必要がある。1MeV 10A程度の加速器をイオンビームのために数十台の並列運転が必要になる。(8)

2.2 燃料注入 燃料注入を核融合炉に行うには、1mm位の直径の氷の粒子をうごかすことのとよくと考えられている。炉心部に氷の粒子をうごかすためには250MeV程度の加速器が必要で、4位の流入率である。(9)

2.2 核融合炉壁損傷の研究 核融合炉壁は10keV以上の超高温プラスマとこども、核融合生成の~~結果~~発生する14.06MeVの中性子束や3.52MeVのヘリウムイオンの入射があること、材質的日問題が一番深刻なところである。この炉壁の寿命をどこまでのぼせるか、また炉壁のスパッタリング係数はどのくらいか、ヘリウムイオンによる blisteringはどうか、中性子による放射線損傷やX線による影響はどうか、これらの問題は現在として将来の核融合炉研究が当面する最重要な課題である。(10) このために、重イオン源、ヘリウムイオン加速器、中性子発生装置などが計画されているが、いずれも現有的なものに比べるとはるかに電流値の大きいものである必要がある。

2.3 電子ビーム核融合 電子ビームによる核融合はレーザ核融合におけるレーザビームを電子銃でおきかえるものであって、Wintenberg⁽¹¹⁾によつて提言され、Yonas⁽¹²⁾によつて研究が行はれてゐる。ビーム入カとして 10^{14} W、 10^6 J程度を要求されるが、この程度に近い電子銃の発生が近時可能になつて来たことがこの方面の研究をそかんせしめた。現在はパルスX線の発生用として10MeV、3MA~5MA程度のもつてつくられてゐるが、これは出力として10¹⁴Wに近い。パルス中も50nsであるので 10^6 Jに達してゐる。この電子ビーム核融合の場合にエネルギー値として3MeV以下の方が割合がよく、大電流を要求されるのでパフォーマンスタの大きな陸地の研究が著大になる。単に面積をひろげてパフォーマンスを大きくしただけでなくさらにはビームのピンチ効果を利用して大電流密度の達成が現在の出来である。

III. Collective Phenomena を用し た 加速器

Collective Phenomena を用し た 粒子加速は、近年の大電流相対論的電子ビームの研究に伴つて、従来の制御出来ぬ実験条件から制御可能な実験にとるゝ人である。電子ビームの電子銃を電場か 10^6 V/cm程度で終るが、さらにもっと高い電場までえられれば今後の問題である。このテーマについてはOlsonの適確なReview⁽¹³⁾があるので、これを一讀せよ。

- (1) Z. Stodziecki et al: The Vacuum Chamber of a Tokamak Plasma Experiment (TFR) Proc. 6th International Vac. Congress, Kyoto 1974
- (2) 佐々木 H. S. Lubell; Summary of Engineering Design of Magnet Systems from International Working Session on Fusion Reactor Technology, 1971: ORNL-TH-3953
- (3) T. Hatori et al: Conceptual Design of an Open-system Reactor with RF Plugging, IAEA Workshop on Fusion Reactor Design Problems, 1974:
- (4) G. T. Konrad: High Efficiency, CW, High Power Klystrons for Storage Ring Applications, Proc. of 1975 Particle Accelerator Conference - Accelerator Engineering and Technology: IEEE Transactions on Nuclear Science NS-22, 1975
- (5) L. Lejeune: Oscillations in Ion-Source Discharges and Their Relation to Ion Beam Properties, Proc. of the 2nd Symposium on Ion Sources and Formation of Ion Beams: 1974 LBL 3399 Paper 1-1
- (6) T. S. Green: Characteristics of Reflex-Discharge Ion Sources: ibid Paper 1-2
- (7) A. Miyahara et al: Toshiba Review, International Edition November 1974
- (8) 佐々木 A report from the Culham Study Group: Neutral Injection Heating of Toroidal Reactors, CLM112 1971:
- (9) S. L. Grubnick: Solid Deuterium Evaporation in a Fusion Plasma, Nuclear Fusion 13 (1973) 703
- (10) C. J. McHargue: The Use of Accelerators to Study Irradiation Effects in Materials, Proc. of 1975 Particle Accelerator Conference - Accelerator Engineering and Technology: IEEE Transactions on Nuclear Science NS-22, 1975
- (11) F. Wintenberg: Initiation of Thermonuclear Reactions by High Current Electron Beams, Nuclear Fusion 12 (1972) 353
- (12) G. Yonas et al: Electron Beam Focussing and Application to Pulsed Fusion, Nuclear Fusion 14 (1974) 731
- (13) C. L. Olson: Collective Acceleration with Intense Electron Beams, Proc. of 1975 Particle Accelerator Conference - Accelerator Engineering and Technology: IEEE Transactions on Nuclear Science NS-22, 1975