



(12) BẢN MÔ TẢ SÁNG CHẾ THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN SÁNG CHẾ

(19) Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ

(11)



1-0031395

(51)⁸ H05H 1/14; H05H 3/00; H05H 1/16;
H05H 1/08

(13) B

(21) 1-2017-01878

(22) 30/10/2015

(86) PCT/US2015/058473 30/10/2015

(87) WO2016/070126 06/05/2016

(30) 62/072,611 30/10/2014 US

(45) 25/03/2022 408

(43) 25/08/2017 353A

(73) TAE Technologies, Inc. (US)

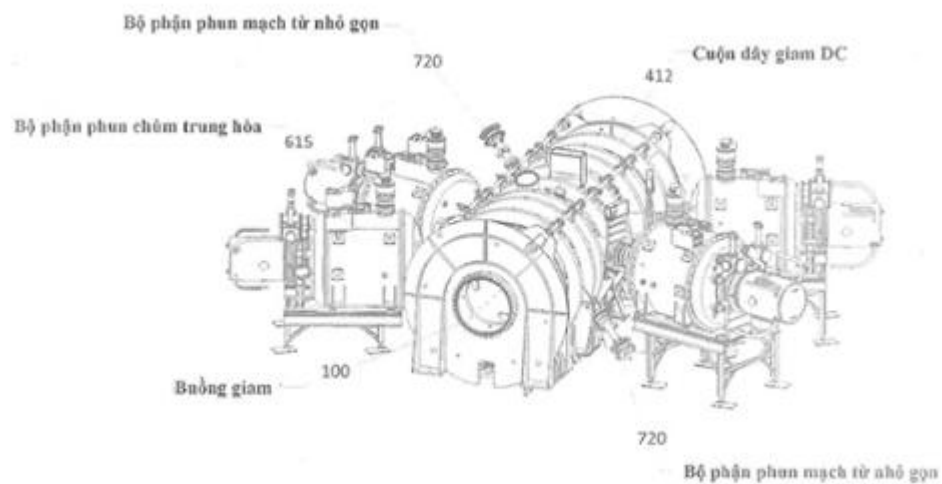
19631 Pauling, Foothill Ranch, California 92610, United States of America

(72) BINDERBAUER, Michl (AT); GARATE, Eusebio (US); PUTVINSKI, Sergei (US);
GOTA, Hiroshi (JP).

(74) Công ty Luật TNHH T&G (TGVN)

(54) HỆ THỐNG VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐỂ TẠO RA VÀ DUY TRÌ CÁC CẤU HÌNH
ĐẢO TRƯỜNG

(57) Sáng chế đề cập đến phương pháp và hệ thống sinh ra và duy trì từ trường với cấu hình đảo trường (field reversed configuration - FRC). Sáng chế đề cập tới hệ thống cấu hình được đảo trường (field reversed configuration - FRC) hiệu năng cao bao gồm bình giam trung tâm, hai vùng hình thành ghim theta trường đảo đối diện theo hướng đường kính được gắn vào bình, và hai buồng chuyển hướng được gắn vào các vùng hình thành. Hệ thống từ tính bao gồm các cuộn dây tựa như là dc được định vị theo hướng trục dọc theo các thành phần hệ thống FRC, các cuộn dây gương tựa như là dc giữa buồng giam và các vùng hình thành, và các chốt cắm gương giữa các vùng hình thành và các bộ chuyển hướng. Các vùng hình thành bao gồm các hệ thống hình thành được tạo môđun có công suất được tạo xung cho phép hình thành theo cách tĩnh và động và tăng tốc các FRC. Hệ thống FRC còn bao gồm các bộ phận phun chùm nguyên tử trung hòa, các bộ phận phun hạt hoặc CT, các hệ thống khử khí, các súng plasma theo hướng trục và điện cực trôi bề mặt thông lượng. Sẽ tốt hơn nếu các bộ phận phun chùm được tạo góc về phía mặt phẳng giữa của buồng. Khi hoạt động, các thông số plasma FRC bao gồm năng lượng nhiệt plasma, tổng số các hạt, bán kính và thông lượng từ bị bẫy là có thể chống đỡ được tại hoặc quanh trị số không đổi mà không bị phân rã trong suốt quá trình phun chùm trung hòa.



Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Các phương án thực hiện được mô tả ở đây đề cập chung tới các hệ thống giam plasma từ tính và, cụ thể hơn là tới các hệ thống và phương pháp tạo thuận tiện cho việc tạo thành và duy trì các cấu hình được đảo trường (Field Reversed Configuration - FRC) với độ ổn định vượt trội cũng như khả năng giam hạt, năng lượng và thông lượng vượt trội.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Cấu hình được đảo trường (Field Reversed Configuration - FRC) thuộc về loại các cấu trúc kết cấu giam plasma từ tính đã được biết tới như là các mạch từ hình xuyên nhỏ gọn (compact toroids - CT). Nó thể hiện các từ trường có cực, trội và sở hữu các trường mạch hình xuyên tự sinh ra bằng không hoặc nhỏ (xem M. Tuszewski, Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988)). Sự hấp dẫn của cấu hình này là chúng có dạng hình học đơn giản để tạo thuận tiện cho việc xây dựng và vận hành, bộ chuyển hướng không bị hạn chế tự nhiên để tạo thuận tiện cho việc trích năng lượng và loại bỏ tro, và β rất cao (β là tỉ lệ của áp suất plasma trung bình so với áp suất từ trường trung bình bên trong FRC), tức là có mật độ năng lượng cao. β cao tự nhiên sẽ là các lợi thế cho việc vận hành một cách kinh tế và cho việc sử dụng của các nhiên liệu không có neutron tiên tiến như D-He³ và p-B¹¹.

Phương pháp truyền thống để tạo thành FRC sử dụng công nghệ ghim θ đảo trường, tạo ra các plasma nóng, có mật độ cao (xem A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion **33**, 27 (1993)). Biến thể của nó là phương pháp dịch chuyển-bẫy mà trong đó plasma được tạo ra trong “nguồn” ghim theta được phun ngay trước hoặc sau ra khỏi một đầu cuối vào trong buồng giam. Sau đó plasmoid dịch chuyển bị bẫy giữa hai gương mạnh tại các đầu cuối của buồng (xem, ví dụ, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, and S. Goto, Phys. Plasmas **2**, 191 (1995)). Khi đã ở trong buồng giam, nhiều phương pháp gia nhiệt và dẫn dòng có thể được sử dụng như là việc phun chùm (trung hòa hoặc đã được trung hòa), các từ trường quay, gia nhiệt RF ômic, v.v. Việc tách của các chức năng

nguồn và giam này đưa ra các ưu điểm kỹ thuật chủ yếu cho các lò phản ứng tổng hợp trong tương lai. Các FRC đã được chứng minh là đặc biệt mạnh mẽ, đàn hồi với biến dạng động, với sự dịch chuyển, và với các sự kiện bất giữ mạnh mẽ. Hơn nữa, chúng thể hiện xu hướng giả định là phù hợp với trạng thái plasma được ưu tiên (xem H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller, and L. C. Steinhauer, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 245001 (2004)). Tiến bộ đáng kể đã được tạo ra trong thập kỷ vừa qua liên quan tới việc phát triển các phương pháp hình thành FRC khác: dung hợp các spheromak với các thành phần xoắn ốc được hướng theo hướm đối diện (xem Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, and T. Okazaki, *Nucl. Fusion* **39**, 2001 (1999)) và bằng cách dẫn dòng với các từ trường quay (Rotating magnetic field - RMF) (xem I. R. Jones, *Phys. Plasmas* **6**, 1950 (1999)) cũng tạo ra độ ổn định bổ sung.

Hiện tại, kỹ thuật va chạm-dung hòa, đã được đề xuất từ lâu (xem D. R. Wells, *Phys. Fluids* **9**, 1010 (1966)) đã phát triển một cách đáng kể: hai phần ghim theta tách biệt tại các đầu cuối đối diện của buồng giam đồng thời sinh ra hai plasmoid và tăng tốc các plasmoid về phía nhau tại tốc độ cao; sau đó chúng va chạm tại trung tâm của buồng giam và hợp nhất để tạo thành FRC hợp phần. Trong việc xây dựng và vận hành thành công của một trong số các thí nghiệm FRC lớn nhất tính tới giờ, phương pháp va chạm-hợp nhất truyền thống đã thể hiện là có thể tạo ra được các FRC ổn định, tồn tại lâu, có thông lượng cao và có nhiệt độ cao (xem M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 045003 (2010)).

Các FRC được tạo thành từ các hình xuyên của các đường trường đóng bên trong bộ phận tách, và của lớp cạnh hình khuyên trên các đường trường mở ngay bên ngoài bộ phận tách. Lớp cạnh kết tụ vào trong các luồng vượt quá chiều dài FRC, tạo ra bộ chuyển hướng tự nhiên. Cấu trúc liên kết FRC trùng với cấu trúc liên kết của plasma gương đảo trường (Field-Reversed-Mirror). Tuy nhiên, khác biệt đáng kể là ở chỗ plasma có β khoảng 10. Từ trường bên trong thấp cố hữu tạo ra cho phân bố hạt động lực học cục bộ cụ thể, tức là các hạt với các bán kính Larmor lớn, khi so sánh với bán kính nhỏ FRC. Ở đó các hiệu ứng động lực mạnh xuất hiện để đóng góp ít nhất một phần vào độ ổn định tổng thể của các FRC trong quá khứ và hiện tại, như các phần đã được tạo ra trong thí nghiệm va chạm-hợp nhất.

Các thí nghiệm FRC thông thường trong quá khứ bị chiếm ưu thế bởi các tổn thất đối lưu với việc giam năng lượng được xác định chủ yếu bởi việc vận chuyển hạt. Các hạt phân tán chủ yếu là theo hướng kính ra khỏi thể tích của bộ phận tách, và sau đó là tổn thất theo hướng trục trong lớp cạnh. Do đó, việc nhốt FRC phụ thuộc vào các tính chất của cả các vùng đường trường đóng hoặc mở. Thời gian phân tán hạt ra khỏi các thang của bộ phận tách là $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a \sim r_s/4$, trong đó r_s là bán kính bộ phận tách trung tâm), và $D_{\perp}$ là khả năng phân tán FRC đặc trưng, do $D_{\perp} \sim 12,5 \rho_{ie}$, với ρ_{ie} thể hiện bán kính quay hồi chuyển ion, được nâng lên tại từ trường được áp dụng từ bên ngoài. Thời gian giam hạt lớp cạnh $\tau_{\parallel}$ về cơ bản là thời gian di chuyển theo trục trong các thí nghiệm FRC trong quá khứ. Trong trạng thái ổn định, sự cân bằng giữa các tổn thất hạt theo hướng kính và hướng trục tạo ra chiều dài độ nghiêng cho mật độ của bộ phận tách $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$. Các thang thời gian giam hạt FRC là $(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ cho các FRC trong quá khứ có mật độ đáng kể tại bộ phận tách (xem M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations," Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988)).

Một nhược điểm khác của các thiết kế hệ thống FRC đã có là việc cần phải sử dụng các phần đa cực bên ngoài để điều khiển các bất ổn định quay như các bất ổn định trao đổi $n=2$ phát triển nhanh. Theo cách này, các trường tứ cực thông thường được áp dụng từ bên ngoài tạo ra áp lực phục hồi từ tính cần thiết để làm suy giảm việc phát triển của các chế độ không ổn định này. Trong khi kỹ thuật này là tương ứng với việc điều khiển ổn định của plasma khối nhiệt, nó lại tạo ra nhiều vấn đề cho nhiều FRC động lực học hoặc cho các FRC lai cải tiến, trong đó phân bố hạt quỹ đạo lớn có động lực cao được kết hợp với plasma nhiệt thông thường. Trong các hệ thống này, các nhiễu loạn của từ trường đối xứng theo trục do các trường đa cực này dẫn tới các tổn thất hạt rất nhanh do khuếch tán ngẫu nhiên không va chạm, là hậu quả của việc mất mát của việc bảo toàn của động lượng góc chính tắc. Giải pháp sáng tạo tạo ra khả năng điều khiển ổn định mà không tăng cường việc phân tán của các hạt bất kỳ và do đó quan trọng là đạt được lợi thế của việc có khả năng đạt hiệu năng cao hơn cho các ý tưởng FRC cải tiến chưa được phát hiện trước đó.

Do đó, trong tình huống nêu trên, mong muốn là cải tiến được việc giam và độ ổn định của các FRC để sử dụng các FRC trạng thái ổn định làm đường dẫn tới toàn bộ các

ứng dụng bao gồm các nguồn neutron nhỏ gọn (cho việc sản xuất đồng vị y tế, xử lý chất thải hạt nhân, nghiên cứu vật liệu, xử lý chất thải hạt nhân, nghiên cứu vật liệu, chụp tia và chụp cắt lớp neutron), các nguồn photon nhỏ gọn (cho việc sản xuất và xử lý hóa học), các hệ thống tách và làm giàu khối, và các lõi lò phản ứng cho việc tổng hợp hạt nhân nhẹ cho việc tạo năng lượng trong tương lai.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Các phương án thực hiện được tạo ra ở đây đề cập tới các hệ thống và phương pháp tạo thuận tiện cho việc hình thành và duy trì các cấu hình được đảo trường (Field Reversed Configurations - FRC) hiệu năng cao mới. Phù hợp với mô hình FRC hiệu năng cao, hệ thống này kết hợp các ý tưởng và phương tiện mới để cải tiến một cách rõ rệt việc giam FRC của các hạt, năng lượng và thông lượng cũng như tạo ra khả năng điều khiển ổn định mà không có các tác dụng phụ xấu.

Hệ thống FRC được tạo ra ở đây bao gồm bình giam trung tâm được bao quanh bởi hai vùng hình thành ghim theta trường đảo đối diện theo hướng đường kính và, vượt quá các vùng hình thành, là hai buồng chuyển hướng để điều khiển mật độ trung hòa và tạp nhiễm không tinh khiết. Hệ thống từ tính bao gồm các chuỗi của các cuộn dây tựa như là dc ở các vị trí theo trục dọc theo các thành phần của hệ thống FRC, các cuộn dây gương tựa như là dc giữa hoặc là đầu cuối của buồng giam hoặc các vùng hình thành liên kề, hoặc các chốt cắm gương bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn giữa từng vùng trong các vùng hình thành và các bộ chuyển hướng tạo thành các trường dẫn hướng bổ sung để tập trung các bề mặt thông lượng từ về phía bộ chuyển hướng. Các vùng hình thành chứa các hệ thống hình thành dạng môđun có công suất được tạo xung cho phép các FRC được tạo thành tại chỗ và sau đó được tăng tốc và được phun (=hình thành tĩnh) hoặc được tạo thành và được tăng tốc đồng thời (=hình thành động).

Hệ thống FRC bao gồm các bộ phận phun chùm nguyên tử trung hòa và bộ phận phun hạt. Theo một phương án thực hiện, các bộ phận phun chùm được tạo góc để phun các hạt trung hòa về phía mặt phẳng giữa. Có các bộ phận phun chùm được tạo góc về phía mặt phẳng giữa và với các vị trí chùm theo hướng trục gần với mặt phẳng giữa sẽ cải thiện việc ghép nối chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng trục trong suốt quá trình phun vào. Các hệ thống khử khí cũng

được chứa như các súng plasma theo trục. Các điện cực trôi cũng được tạo ra cho việc bù điện của các bề mặt thông lượng mở.

Khi hoạt động, các thông số plasma toàn cục FRC bao gồm năng lượng nhiệt plasma, tổng số các hạt, chiều dài và bán kính plasma, cũng như thông lượng từ, về cơ bản là có thể chống đỡ được mà không bị phân rã trong khi các chùm trung hòa được phun vào trong plasma và các hạt tạo ra việc tái nạp liệu hạt thích hợp.

Theo các phương án thực hiện thay thế, bộ phận phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT) được tạo ra thay cho bộ phận phun hạt để tạo ra việc nạp lại nhiên liệu hạt thích hợp bằng cách phun plasma dạng Spheromak.

Các hệ thống, phương pháp, các đặc điểm và các ưu điểm của sáng chế sẽ là, hoặc sẽ trở nên rõ ràng đối với người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật khi xem xét các hình vẽ và phần mô tả chi tiết dưới đây. Nó nhằm mục đích để tất cả các phương pháp, các đặc điểm và các ưu điểm khác nằm trong phần mô tả này, sẽ nằm trong phạm vi bảo hộ của sáng chế, và được bảo vệ bởi các yêu cầu bảo hộ kèm theo. Sáng chế cũng không bị hạn chế vào việc buộc phải có các chi tiết của các phương án thực hiện làm ví dụ.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Các hình vẽ kèm theo, được coi như là một phần của bản mô tả sáng chế này, minh họa các phương án thực hiện được ưu tiên và cùng với phần mô tả chung nêu trên và mô tả chi tiết của phương án thực hiện được ưu tiên bên dưới, nhằm giải thích và chỉ ra các nguyên tắc của sáng chế này.

Fig.1 minh họa việc giam hạt trong hệ thống FRC hiện tại dưới chế độ FRC hiệu năng cao (high performance FRC regime - HPF) so với dưới chế độ FRC thông thường (conventional FRC - CR), và so với các thí nghiệm FRC thông thường khác.

Fig.2 minh họa các thành phần của hệ thống FRC hiện tại và cấu trúc liên kết từ tính của FRC có thể được tạo ra trong hệ thống FRC hiện tại.

Fig.3A minh họa bố trí cơ bản của hệ thống FRC theo sáng chế khi được nhìn từ trên xuống, bao gồm của bố trí được ưu tiên của các chùm trung hòa, các điện cực, các súng plasma, các chốt cắm gương và bộ phận phun hạt.

Fig.3B minh họa bình giam trung tâm khi được nhìn từ trên đỉnh và thể hiện các chùm trung hòa được sắp xếp tại góc trục giao với trục chính đối xứng trong bình giam trung tâm.

Fig.3C minh họa bình giam trung tâm khi được nhìn từ trên đỉnh và thể hiện các chùm trung hòa được sắp xếp tại các góc nhỏ hơn góc trục giao so với trục chính đối xứng trong bình giam trung tâm và được hướng để phun các hạt về phía mặt phẳng giữa của bình giam trung tâm.

Fig.4 minh họa sơ lược các thành phần của hệ thống công suất được tạo xung cho các vùng hình thành.

Fig.5 minh họa hình dạng cự của phần chặn hình thành công suất được tạo xung riêng rẽ.

Fig.6 minh họa hình dạng cự của cụm ống hình thành.

Fig.7 minh họa hình dạng cự cắt riêng phần của hệ thống chùm trung hòa và các thành phần chủ yếu.

Fig.8 minh họa hình dạng cự của cụm chùm trung hòa trên buồng giam.

Fig.9 minh họa hình dạng cự cắt riêng phần của cụm thiết bị được ưu tiên của các hệ thống khử khí Ti và Li.

Fig.10 minh họa hình dạng cự cắt riêng phần của súng plasma được lắp đặt trong buồng bộ chuyển hướng. Cũng được thể hiện trên đó là chốt cấm gương từ tính được kết hợp và cụm điện cực chuyển hướng.

Fig.11 minh họa bố trí được ưu tiên của điện cực trôi dạng hình khuyên tại đầu cuối theo hướng trục của buồng giam.

Fig.12 minh họa việc phát triển của bán kính thông lượng bị loại trừ trong hệ thống FRC thu được từ các chuỗi của các vòng lặp nghịch từ bên ngoài tại hai vùng hình thành ghim theta đảo trường và các đầu dò từ được gắn bên trong buồng giam kim loại trung tâm. Thời gian được đo từ thời điểm trường đảo được đồng bộ trong các nguồn tạo thành, và khoảng cách z được cho là so với mặt phẳng giữa theo trục của máy.

Các hình vẽ từ Fig.13a tới Fig.13d minh họa dữ liệu từ biểu diễn phi HPF, việc xả không được chống đỡ trên hệ thống FRC theo sáng chế. Các hàm của thời gian được thể hiện là (a) bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa, (b) 6 cung của mật độ được tích hợp đường từ mặt phẳng giữa giao thoa kế CO₂, (c) các biên dạng theo hướng kính của mật độ đảo Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO₂, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ cân bằng áp suất.

Fig.14 minh họa các lược tả theo trục thông lượng bị loại trừ tại các thời gian được chọn cho cùng một việc xả của hệ thống FRC theo sáng chế được thể hiện trên Fig.13.

Fig.15 minh họa hình đẳng cự của các cuộn dây hình yên ngựa được gắn bên ngoài buồng giam.

Fig.16 minh họa các tương quan của thời gian sống của FRC và chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun vào. Như được thể hiện, các xung chùm dài hơn tạo ra các FRC sống lâu hơn.

Fig.17 minh họa các hiệu ứng riêng rẽ và được kết hợp của các thành phần khác nhau của hệ thống FRC trên hiệu quả hoạt động của FRC và việc đạt được chế độ HPF.

Các hình vẽ từ Fig.18a đến Fig.18d minh họa dữ liệu từ biểu diễn HPF, việc xả không được chống đỡ trên hệ thống FRC theo sáng chế. Các hàm của thời gian được thể hiện là (a) bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa, (b) 6 cung của mật độ được tích hợp đường từ mặt phẳng giữa giao thoa kế CO₂, (c) các biên dạng theo hướng kính của mật độ đảo Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO₂, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ cân bằng áp suất.

Fig.19 minh họa việc nhốt thông lượng như là hàm của nhiệt độ của điện tử (electron temperature - T_e). Nó thể hiện hiển thị dạng đồ họa của cơ chế định cỡ vượt trội mới được thiết lập cho việc xả HPF.

Fig.20 minh họa thời gian sống của FRC tương ứng với chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun theo cách được tạo góc và không tạo góc.

Các hình Fig.21A và Fig.21B minh họa sơ đồ đơn giản của bộ phận phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT).

Các hình Fig.22A và Fig.22B minh họa bề nhót trung tâm thể hiện bộ phận phun CT được gắn vào đó.

Các hình Fig.23A và Fig.23B minh họa sơ đồ đơn giản của phương án thực hiện thay thế của bộ phận phun CT có ống trôi dạt được gắn vào đó.

Cần chú ý rằng các hình vẽ không nhất thiết phải được vẽ theo cùng một tỉ lệ và các thành phần của các cấu trúc hoặc các chức năng tương tự sẽ được thể hiện chung bởi các số chỉ dẫn giống nhau trong toàn bộ các hình vẽ để minh họa. Cũng cần chú ý rằng các hình vẽ chỉ nhằm mục đích tạo thuận tiện cho việc mô tả các phương án thực hiện khác nhau được mô tả ở đây. Các hình vẽ không nhất thiết phải mô tả mọi khía cạnh của các chỉ dẫn được bộc lộ ở đây và không làm hạn chế phạm vi bảo hộ của các yêu cầu bảo hộ kèm theo.

Mô tả chi tiết sáng chế

Các phương án thực hiện này được tạo ra ở đây đề cập tới các hệ thống và phương pháp tạo thuận tiện cho việc tạo thành và duy trì các cấu hình đảo trường (Field Reversed Configurations - FRC) hiệu năng cao với độ ổn định vượt trội cũng như với khả năng giam hạt, năng lượng, thông lượng tốt hơn các FRC thông thường. Các FRC hiệu năng cao này tạo ra con đường dẫn tới toàn bộ các ứng dụng bao gồm các nguồn neutron nhỏ gọn (cho việc sản xuất đồng vị y tế, xử lý chất thải hạt nhân, nghiên cứu vật liệu, xử lý rác thải hạt nhân, nghiên cứu vật liệu, chụp tia và chụp cắt lớp neutron), các nguồn photon nhỏ gọn (cho việc sản xuất và xử lý hóa học), các hệ thống tách và làm giàu khối, và các lõi lò phản ứng cho việc tổng hợp hạt nhân nhẹ để tạo năng lượng trong tương lai.

Các hệ thống lệ thuộc và các chế độ vận hành đã được phát hiện để đánh giá xem liệu có cơ chế giam vượt trội trong các FRC hay không. Các nỗ lực này đã dẫn tới các phát hiện đột phá và việc phát triển của mẫu FRC hiệu năng cao được mô tả ở đây. Phù hợp với mẫu mới này, các hệ thống và phương pháp hiện tại kết hợp nhiều ý tưởng và phương tiện mới để cải tiến một cách mạnh mẽ việc giam FRC như được minh họa trên Fig.1 cũng như tạo ra khả năng điều khiển ổn định mà không có các tác dụng có hại. Như được thảo luận chi tiết hơn ở dưới, Fig.1 mô tả việc giam hạt trong hệ thống FRC 10 được mô tả bên dưới (xem các Fig.2 và Fig.3), vận hành phù hợp với chế độ FRC hiệu năng cao (High Performance FRC - HPF) để tạo thành và duy trì FRC so với việc vận

hành phù hợp với chế độ CR thông thường để tạo thành và duy trì FRC, và so với việc giam hạt theo cách chế độ thông thường để tạo thành và duy trì FRC đã được sử dụng trong các thí nghiệm khác. Phần bổ cập này sẽ lược tả và mô tả chi tiết các thành phần riêng rẽ, mới của hệ thống FRC 10 và các phương pháp, cũng như các hiệu quả tổng hợp của chúng.

Mô tả của hệ thống FRC

Hệ thống chân không

Các hình vẽ Fig.2 và Fig.3 mô tả sơ lược của hệ thống FRC theo sáng chế 10. Hệ thống FRC 10 bao gồm bình giam trung tâm 100 được bao quanh bởi hai vùng hình thành ghim theta trường đảo đổi diện theo hướng đường kính 200 và, vượt quá các vùng hình thành 200, là hai buồng chuyển hướng 300 để điều khiển mật độ trung hòa và tạp nhiễm không tinh khiết. Hệ thống FRC theo sáng chế 10 được xây dựng để chứa chân không siêu cao và vận hành tại các áp suất cơ sở thông thường là $133,32 \times 10^{-8}$ Pa (10^{-8} torr). Các áp suất chân không này yêu cầu việc sử dụng các vành mép ăn khớp được bơm kẹp giữa các thành phần ăn khớp, các vòng O bằng kim loại, các thành bên trong có độ tinh khiết cao, cũng như việc điều hòa bề mặt ban đầu một cách cẩn thận cho tất cả các phần trước khi lắp ráp, như việc làm sạch vật lý và hóa học và tiếp tục bởi việc nung chân không trong 24 giờ ở nhiệt độ 250°C và việc làm sạch phóng điện chớp sáng Hydro.

Các vùng hình thành ghim theta trường đảo 200 là các ghim theta trường đảo tiêu chuẩn (field-reversed-theta-pinch - FRTP), thậm chí là với hệ thống hình thành công suất được tạo xung cải tiến được thảo luận chi tiết ở dưới (xem Fig.4 đến Fig.6). Mỗi vùng hình thành 200 được tạo thành từ các ống thạch anh cấp độ công nghiệp, mờ đục tiêu chuẩn có lớp lót bên trong dày 2 milimet là thạch anh siêu tinh khiết. Buồng giam 100 được tạo thành từ thép không gỉ để cho phép tạo nhiều cổng theo hướng kính và hướng tiếp tuyến; nó cũng phục vụ như là bộ phận dự trữ thông lượng trên thang thời gian của các thí nghiệm được mô tả bên dưới và hạn chế các chuyển tiếp từ tính nhanh. Chân không được tạo ra và được duy trì nằm trong hệ thống FRC 10 với bộ các bơm thô cuộn khô, các bơm turbo phân tử và các bơm lạnh.

Hệ thống từ tính

Hệ thống từ tính 400 được minh họa trên Fig.2 và Fig.3. Fig.2, trong các đặc điểm khác, minh họa thông lượng từ FRC và các đường viền mật độ (như là các hàm của các tọa độ theo bán kính và theo trục) thuộc về FRC 450 là có thể sản xuất được bởi hệ thống FRC 10. Các đường viền này được thu bởi việc mô phỏng số Hall-MHD điện trở 2-D sử dụng mã được phát triển bởi các hệ thống và phương pháp mô phỏng tương ứng với hệ thống FRC 10, và phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm được đo. Như có thể thấy trên Fig.2, FRC 450 chứa hình xuyên của các đường trường đóng tại phần bên trong 453 của FRC 450 bên trong bộ phận tách 451, và của lớp cạnh hình khuyên 456 trên các đường trường mở 452 ngay bên ngoài bộ phận tách 451. Lớp cạnh 456 kết tụ vào trong các luồng 454 vượt quá chiều dài FRC, tạo ra bộ chuyển hướng tự nhiên.

Hệ thống từ tính chính 410 bao gồm nhiều chuỗi của các cuộn dây tựa như là dc 412, 414, và 416 nằm tại các vị trí theo hướng trục cụ thể dọc theo các thành phần, tức là dọc theo buồng giam 100, các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300, của hệ thống FRC 10. Các cuộn dây tựa như là dc 412, 414 và 416 được nạp bởi các nguồn cấp công suất chuyển mạch tựa như là dc và tạo ra các trường dịch chuyển từ cơ bản khoảng 0,1T trong buồng giam 100, các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300. Bên cạnh các cuộn dây tựa như là dc 412, 414 và 416, hệ thống từ tính chính 410 bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc 420 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) giữa hoặc là đầu cuối của buồng giam 100 hoặc là các vùng hình thành liền kề 200. Các cuộn dây gương tựa như là dc 420 tạo ra các tỉ lệ gương từ tính lên tới 5 và có thể được tạo năng lượng một cách độc lập cho việc điều khiển cân bằng chính xác. Ngoài ra, các chốt cấm gương 440, được định vị giữa mỗi vùng trong các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300. Các chốt cấm gương 440 bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn 430 và các cuộn dây chốt cấm gương 444. Các cuộn dây gương tựa như là dc 430 chứa ba cuộn dây 432, 434 và 436 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) tạo ra các trường dẫn hướng bổ sung để tập trung các bề mặt thông lượng từ 455 về phía đường dẫn có đường kính nhỏ 442 đi qua các cuộn dây chốt cấm gương 444. Các cuộn dây chốt cấm gương 444, bọc quanh đường dẫn có đường kính nhỏ 442 và được nạp bởi mạch công suất được tạo xung LC, tạo ra các trường gương từ tính mạnh lên tới 4T. Mục đích của toàn bộ bố trí cuộn dây này là để bó chặt và dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ 455 và các luồng phun tạo luồng cuối 454 vào trong các buồng từ xa 310

của các bộ chuyển hướng 300. Cuối cùng, bộ “các ăng ten” cuộn dây hình yên ngựa 460 (xem Fig.15) được định vị bên ngoài buồng giam 100, hai phần trên mỗi cạnh của mặt phẳng giữa, và được nạp vào trong các nguồn cấp công suất dc. Các ăng ten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể được định cấu hình để tạo ra trường lưỡng cực hoặc tứ cực từ tính tựa như là tĩnh có độ lớn khoảng 0,01T để điều khiển các độ bất ổn định quay và/hoặc điều khiển dòng điện tử. Các ăng ten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể tạo ra các từ trường một cách linh hoạt hoặc là đối xứng hoặc là phi đối xứng quanh mặt phẳng giữa của máy, phụ thuộc vào hướng của các dòng được áp dụng.

Các hệ thống hình thành công suất được tạo xung

Các hệ thống hình thành có công suất được tạo xung 210 vận hành trên nguyên tắc ghim theta được biến đổi. Có hai hệ thống mà mỗi hệ thống cấp năng lượng cho một vùng trong các vùng hình thành 200. Các hình vẽ Fig.4 tới Fig.6 minh họa các khối xây dựng chính và bố trí của các hệ thống hình thành 210. Hệ thống hình thành 210 được tạo thành từ bố trí công suất được tạo xung được môđun hóa chứa các bộ phận riêng rẽ (=các bộ phận chèn) 220 mà mỗi phần tạo năng lượng cho bộ con của các cuộn dây 232 của kết cấu bẫy 230 (=các bẫy) bọc quanh các ống thạch anh hình thành 240. Mỗi bộ phận chèn 220 được tạo thành từ các tụ 221, các bộ phận cảm ứng 223, các chuyển mạch dòng cao, nhanh 225 và bộ kích hoạt được kết hợp 222 và mạch kết xuất 224. Tổng lại, mỗi hệ thống hình thành 210 lưu năng lượng điện dung giữa 350-400kJ, tạo công suất lên tới 35GW để tạo thành và tăng tốc các FRC. Đạt được việc vận hành được phối hợp của các thành phần này thông qua hệ thống kích hoạt và điều khiển 222 và 224 đã biết tới trong tình trạng kỹ thuật của sáng chế cho phép định thời được đồng bộ giữa các hệ thống hình thành 210 trên từng vùng hình thành 200 và tối thiểu hóa độ dài xung chuyển mạch tới cỡ hàng chục nano giây. Ưu điểm của thiết kế được môđun hóa này là việc vận hành linh hoạt của nó: Các FRC có thể được tạo thành tại chỗ và sau đó được tăng tốc và được phun vào (=việc hình thành tĩnh) hoặc được tạo thành và được tăng tốc đồng thời (=việc hình thành động).

Các bộ phận phun chùm tia trung hòa

Các chùm nguyên tử trung hòa 600 được triển khai trên hệ thống FRC 10 để tạo ra việc gia nhiệt và việc dẫn dòng cũng như để phát triển áp suất hạt nhanh. Như được thể

hiện trên Fig.3A, Fig.3B và Fig.8, các đường chùm riêng rẽ bao gồm các hệ thống phun chùm nguyên tử trung hòa 610 và 640 được định vị bao quanh buồng giam trung tâm 100 và phun các hạt nhanh theo tiếp tuyến với plasma FRC (và vuông góc hoặc tại góc pháp tuyến với trục đối xứng chính trong bình giam trung tâm 100) với thông số tác động sao cho vùng bắn đích nằm trong bộ phận tách 451 (xem Fig.2). Mỗi hệ thống phun 610 và 640 đều có khả năng phun với công suất chùm trung hòa lên tới 1MW vào trong plasma FRC với các năng lượng hạt giữa 20keV và 40keV. Các hệ thống 610 và 640 là dựa trên các nguồn trích có nhiều khe hở cho ion dương và sử dụng việc tập trung hình học, việc làm lạnh quán tính của các lưới trích ion và bơm vi phân. Bên cạnh việc sử dụng các nguồn plasma khác nhau, các hệ thống 610 và 640 được tạo khác biệt chủ yếu bởi thiết kế vật lý của chúng để đáp ứng với các vị trí gắn tương ứng, các khả năng tạo ra ở cạnh và phun ở trên đỉnh của chúng. Các thành phần thông thường của các bộ phận phun chùm trung hòa này thường được minh họa trên Fig.7 cho các hệ thống phun ở cạnh 610. Như được thể hiện trên Fig.7, mỗi hệ thống chùm trung hòa riêng rẽ 610 bao gồm nguồn plasma RF 612 tại đầu cuối phun vào (nó được thể với nguồn hồ quang trong các hệ thống 640) với màn từ 614 che phủ đầu cuối. Nguồn quang học ion và các lưới gia tốc 616 được gắn vào nguồn plasma 612 và van cổng 620 được định vị giữa nguồn quang học ion và các lưới gia tốc 616 và bộ phận trung hòa 622. Nam châm làm lệch 624 và kết xuất 628 được định vị giữa bộ phận làm trung hòa 622 và thiết bị ngắt 630 tại đầu cuối ra. Hệ thống làm mát bao gồm hai cơ cấu làm đông lạnh 634, hai tấm lạnh 636 và phần bao phủ LN2 638. Thiết kế linh hoạt này cho phép vận hành trên một khoảng giới hạn rộng của các thông số FRC.

Cấu hình thay thế cho các bộ phận phun chùm nguyên tử trung hòa 600 là ở chỗ việc phun của các hạt nhanh theo tiếp tuyến với plasma FRC, nhưng với góc A nhỏ hơn 90° so với trục đối xứng chính trong bình giam trung tâm 100. Các loại định hướng này của các bộ phận phun chùm 615 được thể hiện trên Fig.3C. Ngoài ra, các bộ phận phun chùm 615 có thể được định hướng sao cho các bộ phận phun chùm 615 trên một trong các cạnh của mặt phẳng giữa của bình giam trung tâm 100 phun các hạt của chúng về phía mặt phẳng giữa. Cuối cùng, vị trí theo hướng trục của các hệ thống chùm này 600 có thể được chọn gần hơn với mặt phẳng giữa. Các phương án thực hiện phun thay thế này tạo thuận tiện cho nhiều lựa chọn tiếp liệu trung tâm hơn, sẽ tạo ra việc gắn kết tốt

hơn của các chùm và tạo hiệu suất bắn cao hơn cho các hạt nhanh được phun vào. Hơn nữa, phụ thuộc vào góc và vị trí theo trục, bố trí này của các bộ phận phun chùm 615 cho phép điều khiển trực tiếp và độc lập hơn cho việc kéo dài theo trục và các đặc tính khác của FRC 450. Ví dụ, việc phun của các chùm tại góc nông A so với trục đối xứng chính của bình sẽ tạo plasma FRC với việc mở rộng theo trục dài hơn và nhiệt độ thấp hơn, trong khi việc lựa chọn góc A vuông hơn sẽ dẫn tới plasma ngắn hơn theo hướng trục nhưng lại nóng hơn. Theo cách này, góc phun A và vị trí của các bộ phận phun chùm 615 có thể được tối ưu hóa cho các mục đích khác nhau. Ngoài ra, việc tạo góc và định vị này của các bộ phận phun chùm 615 có thể cho phép các chùm có năng lượng cao hơn (nói chung là ưu tiên hơn để lắng đọng nhiều lắng đọng hơn với ít sự phân tán chùm hơn) có thể được phun vào trong các từ trường thấp hơn mà theo cách khác, là cần thiết để bắn các chùm này. Đó là do thực tế là thành phần theo phương vị của năng lượng xác định quy mô quỹ đạo ion nhanh (trở nên nhỏ hơn nhanh chóng khi tại năng lượng chùm không đổi, góc phun so với trục đối xứng chính của bình được giảm). Hơn nữa, việc phun được tạo góc về phía mặt phẳng giữa và với các vị trí chùm theo hướng trục gần với mặt phẳng giữa sẽ cải thiện việc ghép nối chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng trục trong suốt quá trình phun vào.

Các bộ phận phun hạt

Để tạo ra các phương tiện để phun các hạt mới và điều khiển tốt hơn tồn trữ hạt FRC, bộ phận phun hạt 12 bình 700 (xem, ví dụ, I. Vinyar et al., “Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, và HL-2A,” Proceedings của 26th Fusion Science và Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010)) sẽ được sử dụng trên hệ thống FRC 10. Fig.3 minh họa thiết kế của bộ phận phun hạt 700 trên hệ thống FRC 10. Các hạt hình trụ ($D \sim 1\text{mm}$, $L \sim 1\text{--}2\text{mm}$) được phun vào trong FRC với vận tốc trong khoảng giới hạn là 150–250km/s. Mỗi hạt riêng rẽ chứa khoảng 5×10^{19} nguyên tử hydro, là có thể so sánh được với tồn trữ hạt FRC.

Các hệ thống khử khí

Đã biết tới rộng rãi rằng khí quãng sáng trung hòa là vấn đề nghiêm trọng trong các hệ thống giam. Các quy trình trao đổi và luân chuyển điện tích (phát ra vật liệu không nguyên chất lạnh từ thành) có thể có tác động tàn phá trên việc giam năng lượng và hạt.

Ngoài ra, mật độ đáng kể của khí trung hòa tại gần cạnh sẽ dẫn tới việc thúc đẩy các tổn thất, ít nhất là cắt ngắn nhiều thời gian sống của các hạt (năng lượng cao) có quỹ đạo lớn được phun vào (quỹ đạo lớn đề cập tới các hạt có các quỹ đạo trên quy mô của cấu trúc liên kết FRC hoặc ít nhất là bán kính quỹ đạo lớn hơn quy mô chiều dài độ dốc từ trường đặc trưng) – thực tế là bất lợi cho tất cả các ứng dụng plasma mạnh mẽ, bao gồm việc dung hợp thông qua việc gia nhiệt chùm phụ trợ.

Việc điều hòa bề mặt là các cách thức mà nhờ đó các hiệu ứng có hại của khí trung hòa và các tạp chất có thể được điều khiển hoặc được làm giảm trong hệ thống giam. Tới phía này, hệ thống FRC 10 được tạo ra ở đây sử dụng các hệ thống lắng đọng titan và lithi 810 và 820 phủ các bề mặt đối diện với plasma của buồng giam (hoặc bình) 100 và các bộ phận chuyển hướng 300 với các màng (độ dày cỡ chục micro mét) của Ti và/hoặc Li. Có thể thu được các lớp phủ thông qua các kỹ thuật lắng đọng hơi. Li và/hoặc Ti rắn được làm bay hơi và/hoặc được thăng hoa và được phun lên trên các bề mặt gần kề để tạo thành các lớp phủ. Các nguồn là các lò nguyên tử với các vòi phun dẫn hướng (trong trường hợp của Li) 822 hoặc các hình cầu bị gia nhiệt của chất rắn với vỏ che vành đai dẫn hướng (trong trường hợp Ti) 812. Các hệ thống bay hơi Li thường vận hành trong chế độ liên tục trong khi các thành phần thăng hoa Ti hầu hết được vận hành gián đoạn giữa việc vận hành của plasma. Các nhiệt độ vận hành của các hệ thống này là trên 600°C để thu được các tốc độ lắng đọng nhanh. Để đạt được việc che phủ thành tốt, cần thiết có nhiều hệ thống bốc hơi/thăng hoa được định vị theo cách có tính toán. Fig.9 mô tả chi tiết bố trí được ưu tiên của các hệ thống lắng đọng khử khí 810 và 820 trong hệ thống FRC 10. Các lớp phủ hoạt động như là các bề mặt khử khí và việc bơm nguyên tử hiệu quả và các mẫu hydro phân tử (H và D). Các lớp phủ cũng làm giảm các tạp nhiễm thông thường khác như cacbon và oxi tới các mức không đáng kể.

Các chốt cấm gương

Như chỉ ra ở trên, hệ thống FRC 10 sử dụng các bộ của các cuộn dây gương 420, 430, và 444 như được thể hiện trên Fig.2 và Fig.3. Bộ thứ nhất của các cuộn dây gương 420 được định vị nằm trong hai đầu cuối theo trục của buồng giam 100 và được cấp năng lượng độc lập từ các cuộn dây giam 412, 414 và 416 của hệ thống từ tính chính 410. Bộ thứ nhất của các cuộn dây gương 420 chủ yếu giúp lái và chứa theo trục FRC 450 trong

khi hợp nhất và tạo ra khả năng điều khiển cân bằng chính xác trong khi chống đỡ. Bộ cuộn dây gương thứ nhất 420 tạo ra các từ trường danh nghĩa (khoảng 0,4 đến 0,5T) cao hơn trường giam trung tâm được tạo ra bởi các cuộn dây giam trung tâm 412. Bộ thứ hai của các cuộn dây gương 430, bao gồm ba cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn 432, 434 và 436, được định vị giữa các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300 và được dẫn bởi việc cấp nguồn chuyển mạch chung. Các cuộn dây gương 432, 434 và 436, cùng với các cuộn dây được tạo xung chốt cắm gương nhỏ gọn hơn 444 (được nạp bởi việc cấp công suất điện dung) và phần thất vào vật lý 442 tạo thành các chốt cắm gương 440 tạo ra đường dẫn khí thấp, hẹp với các từ trường rất cao (giữa 2 tới 4T với các thời gian thẳng từ khoảng 10 tới 20ms). Các cuộn dây được tạo xung gương nhỏ gọn nhất 444 là các kích cỡ theo hướng kính nhỏ gọn, cỡ 20cm và chiều dài tương tự, khi so sánh với cỡ mét hoặc dài hơn và thiết kế bánh kẹp của các cuộn dây giam 412, 414 và 416. Mục đích của các chốt cắm gương 440 là để nhân lên: (1) Các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 bó chặt và dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ 452 và các luồng phun tạo luồng cuối 454 vào trong các buồng chuyển hướng từ xa 300. Nó đảm bảo rằng các hạt thải đạt tới được các bộ chuyển hướng 300 một cách thích hợp và có các bề mặt thông lượng liên tục 455 mà đi từ vùng đường trường mở 452 của FRC trung tâm 450 đến hết đường tới các bộ chuyển hướng 300. (2) Các phần thất vào vật lý 442 trong hệ thống FRC 10, mà qua đó các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 cho phép tạo thành đường dẫn của các bề mặt thông lượng từ 452 và các luồng phun plasma 454, tạo ra trở ngại cho khí trung hòa chảy từ các súng plasma 350 nằm trong các bộ chuyển hướng 300. Theo cùng một mạch, các phần thất vào 442 hạn chế việc tạo dòng ngược lại của khí từ các vùng hình thành 200 tới các bộ chuyển hướng 300 nhờ đó làm giảm số hạt trung hòa được đưa vào trong toàn bộ hệ thống FRC 10 khi bắt đầu việc khởi đầu của FRC. (3) Các gương theo hướng trục mạnh mẽ được tạo ra bởi các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 làm giảm tổn thất hạt theo hướng trục và nhờ đó làm giảm tính khuếch tán hạt song song trên các đường trường mở.

Các súng plasma theo trục

Các luồng plasma từ các súng 350 được gắn trong các buồng chuyển hướng 310 của các bộ chuyển hướng 300 nhằm cải thiện độ ổn định và hiệu quả hoạt động của chùm trung hòa. Các súng 350 được gắn trên trục bên trong buồng 310 của các bộ chuyển

hướng 300 như được minh họa trên Fig.3 và Fig.10 và tạo ra dòng chảy plasma dọc các đường thông lượng mở 452 trong bộ chuyển hướng 300 và về phía trung tâm của buồng giam 100. Các súng 350 vận hành tại việc xả khí mật độ cao trong kênh chổng đệm và được thiết kế để tạo ra plasma được ion hóa hoàn toàn cỡ vài kiloampe từ 5ms tới 10ms. Các súng 350 chứa cuộn từ tính được tạo xung phù hợp với luồng plasma đầu ra với kích cỡ mong muốn của plasma trong buồng giam 100. Các thông số kỹ thuật của các súng 350 được tạo khác biệt bởi kênh có đường kính ngoài từ 5cm đến 13cm và đường kính trong lên tới khoảng 10cm và tạo ra dòng xả từ 10kA đến 15 kA tại điện thế 400-600V với từ trường bên trong súng giữa 0,5T đến 2,3T.

Các luồng plasma từ súng có thể xâm nhập các từ trường của các chốt cấm gương 440 và chảy vào trong vùng hình thành 200 và buồng giam 100. Hiệu quả của việc chuyển plasma qua chốt cấm gương 440 tăng với việc giảm khoảng cách giữa súng 350 và chốt 440 và bằng cách tạo chốt 440 rộng hơn và ngắn hơn. Dưới các điều kiện hợp lý, mỗi súng trong các súng 350 có thể phân phát xấp xỉ 10^{22} proton/s qua các chốt cấm gương 440 từ 2T tới 4T với các nhiệt độ ion và điện tử cao một cách tương ứng khoảng từ 150eV đến 300eV và khoảng từ 40eV tới 50eV. Các súng 350 tạo ra việc nạp lại nhiên liệu một cách đáng kể của lớp cạnh FRC 456, và việc giam hạt FRC tổng hợp được cải thiện.

Để tiếp tục tăng mật độ plasma, hộp khí có thể được tận dụng để phụt khí bổ sung vào trong luồng plasma từ các súng 350. Kỹ thuật này cho phép việc tăng gấp nhiều lần mật độ plasma được phun vào. Trong hệ thống FRC 10, hộp khí được lắp đặt trên bộ chuyển hướng 300 bên cạnh các chốt cấm gương 440 cải thiện việc nạp lại nhiên liệu của FRC lớp cạnh 456, việc hình thành của FRC 450, và việc bó buộc theo đường của plasma.

Xem xét tất cả các thông số điều chỉnh được thảo luận ở trên và cũng xem xét việc vận hành có thể thực hiện với chỉ một hoặc cả các súng, rõ ràng rằng phổ rộng của các chế độ vận hành là không thể truy cập được.

Các điện cực trôi

Việc trôi dạt điện của các bề mặt thông lượng mở có thể tạo ra các thế theo hướng kính tăng dịch chuyển $E \times B$ theo góc phương vị tạo ra cơ chế điều khiển, tương tự với

việc chỉnh nùm, để điều khiển việc quay của đường trường mở plasma cũng như lõi FRC thực sự 450 thông qua vận tốc trượt. Để hoàn thiện việc điều khiển này, hệ thống FRC 10 sử dụng các điện cực khác nhau được đặt theo cách có chiến lược trong các phần của máy. Fig.3 mô tả điện cực trôi được định vị tại các vị trí được ưu tiên nằm trong hệ thống FRC 10.

Nói chung, có 4 loại điện cực: (1) các điện cực điểm 905 trong buồng giam 100 tạo tiếp xúc với các đường trường mở cụ thể 452 trong cạnh của FRC 450 để tạo ra việc nạp cục bộ, (2) các điện cực hình khuyên 900 giữa buồng giam 100 và các vùng hình thành 200 để nạp cho các lớp thông lượng xa cạnh 456 theo cách đối xứng theo phương vị, (3) các chông của các điện cực đồng tâm 910 trong các bộ chuyển hướng 300 để nạp cho nhiều lớp thông lượng đồng tâm 455 (nhờ đó việc chọn của các lớp là có thể lựa chọn được bằng cách điều chỉnh các cuộn dây 416 để điều chỉnh bộ chuyển hướng từ trường để dùng các lớp thông lượng mong muốn 456 trên các điện cực thích hợp 910), và cuối cùng là (4) tự bản thân các anốt 920 (xem Fig.10) của các súng plasma 350 (cắt các bề mặt thông lượng mở bên trong 455 gần bộ phận tách của FRC 450). Các hình vẽ Fig.10 và Fig.11 thể hiện một số thiết kế thường gặp cho một số chúng.

Trong tất cả các trường hợp, tất cả các điện cực này được dẫn bởi các nguồn công suất xung hoặc nguồn công suất dc tại các điện thế lên tới khoảng 800V. Phụ thuộc vào kích cỡ điện cực và các bề mặt thông lượng nào bị cắt, các dòng có thể được rút trong khoảng giới hạn cỡ kilo-ampe.

Việc vận hành không được chống đỡ liên tục của hệ thống FRC - Chế độ thông thường

Việc hình thành plasma tiêu chuẩn trên hệ thống FRC 10 sẽ tuân theo kỹ thuật ghim theta trường đảo đã được phát triển đầy đủ. Quy trình thông thường cho việc khởi động các khởi đầu FRC bằng cách dẫn các cuộn dây tựa như là dc 412, 414, 416, 420, 432, 434 và 436 tới việc vận hành trạng thái ổn định. Các mạch công suất được tạo xung RFTP của các hệ thống hình thành có năng lượng được tạo xung 210 sau đó dẫn các cuộn dây trường nam châm đảo nhanh được tạo xung 232 để tạo dịch chuyển đảo tạm thời khoảng $-0,05T$ trong các vùng hình thành 200. Tại điểm này, lượng định trước của khí trung hòa tại áp suất 9-20psi được phun vào trong hai thể tích hình thành được xác định bởi các buồng ống thạch anh 240 của các vùng hình thành (bắc và nam) 200 thông qua

bộ các van phụt được định hướng theo góc phương vị tại các vành mép ở trên các đầu cuối phía ngoài của các vùng hình thành 200. Tiếp theo, trường RF nhỏ ($\sim$ vài trăm kilohertz) được sinh ra từ bộ các ăng ten trên bề mặt của các ống thạch anh 240 để tạo ra việc ion hóa từ trước ở dạng của các vùng ion hóa nhân cục bộ nằm trong các cột khí trung hòa. Nó được tiếp theo bởi việc áp dụng việc môđun hóa kết vòng theta trên việc dẫn dòng cho các cuộn dây trường nam châm đảo nhanh được tạo xung 232, dẫn tới việc ion hóa từ trước mang tính chất toàn cục hơn của các cột khí. Cuối cùng, các bộ phận trữ công suất được tạo xung chính của các hệ thống hình thành có năng lượng được tạo xung 210 được bắn để dẫn các cuộn dây trường nam châm đảo ngược nhanh được tạo xung 232 để tạo trường dịch chuyển về phía trước lên tới 0,4T. Bước này có thể được sắp xếp theo thời gian sao cho trường được dịch chuyển về phía trước được sinh ra đồng đều trong suốt chiều dài của các ống hình thành 240 (việc hình thành tĩnh) hoặc sao cho đạt được việc môđun hóa trường nhu động liên tiếp dọc trục của các ống hình thành 240 (việc hình thành động).

Trong toàn bộ quy trình hình thành này, trường thực tế đảo ngược trong plasma xuất hiện một cách nhanh chóng, nằm trong khoảng $5\mu\text{s}$. Công suất được tạo xung cỡ nhiều gigawatt được phân phối tới phần plasma hình thành sẵn sàng để tạo ra các FRC nóng sau đó được phun từ các vùng hình thành 200 thông qua ứng dụng của hoặc là việc điều biến được sắp xếp theo thời gian của từ trường chuyển tiếp (nhu động từ) hoặc các dòng được tăng tạm thời trong các cuộn dây cuối cùng của các bộ cuộn dây 232 gần các đầu cuối bên ngoài trục của các ống hình thành 210 (tạo thành độ dốc từ trường theo trục mà quay theo hướng trục về phía buồng giam 100). Hai phần FRC hình thành (bắc và nam) được tạo thành và được tăng tốc sau đó mở rộng vào trong buồng giam có đường kính lớn hơn 100, trong đó các cuộn dây tựa như là dc 412 tạo ra trường được dịch chuyển về phía trước để điều khiển việc mở rộng theo hướng kính và tạo ra thông lượng từ bên ngoài cân bằng.

Khi các hình thành FRC bắc và nam đi tới gần mặt phẳng giữa của buồng giam 100, các FRC sẽ va chạm. Trong quá trình va chạm, các năng lượng động lượng theo hướng trục của các hình thành FRC bắc và nam được gia nhiệt rất lớn khi các FRC cuối cùng hợp nhất vào trong một FRC đơn 450. Bộ lớn các chẩn đoán plasma là có sẵn trong

buồng giam 100 để nghiên cứu sự cân bằng của FRC 450. Các điều kiện vận hành thông thường trong hệ thống FRC 10 tạo ra các FRC hợp phân với bán kính bộ phận tách khoảng 0,4m và mở rộng theo hướng trục khoảng 3m. Các đặc điểm khác là các từ trường bên ngoài khoảng 0,1T, các mật độ plasma khoảng $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ và nhiệt độ plasma tổng lên tới 1keV. Không có sự chống đỡ bất kỳ nào, tức là không có việc gia nhiệt và/hoặc dòng dẫn qua việc phun chùm trung hòa hoặc các phương tiện hỗ trợ khác, thời gian sống của các FRC này bị hạn chế tới khoảng 1ms, thời gian phân rã cấu hình đặc trưng bản địa.

Dữ liệu thực nghiệm của việc vận hành không được chống đỡ - Chế độ thông thường

Fig.12 thể hiện diễn tiến theo thời gian thông thường của bán kính thông lượng bị loại trừ, $r_{\Delta\Phi}$, xấp xỉ bán kính bộ phận tách, r_s , để minh họa các động lực học của quy trình dung hợp ghim theta của FRC 450. Hai plasmoid riêng rẽ (bắc và nam) được tạo ra đồng thời và sau đó được tăng tốc ra khỏi các vùng hình thành tương ứng 200 tại tốc độ siêu âm, $v_z \sim 250 \text{ km/s}$, và va chạm gần mặt phẳng giữa tại $z = 0$. Trong suốt quá trình va chạm, các plasmoid nén theo hướng trục, tiếp theo bởi việc mở rộng nhanh theo hướng kính và hướng trục, trước hợp nhất cuối cùng để tạo thành FRC 450. Cả động lực học theo hướng kính và theo hướng trục của việc hợp nhất FRC 450 đều có chứng cứ bởi các đo đặc biên dạng mật độ chi tiết và việc chụp cắt lát dựa trên nhiệt bức xạ kế.

Dữ liệu từ thể hiện của việc xả không được chống đỡ của hệ thống FRC 10 được thể hiện như là các hàm của thời gian trên Fig.13. FRC được bắt đầu tại $t = 0$. Bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa theo trục của máy được thể hiện trên Fig.13a. Dữ liệu này được thu từ mảng các đầu dò từ tính, nằm ngay bên trong thành thép không gỉ của buồng giam, đo từ trường theo trục. Thành thép là bộ phận lưu giữ thông lượng tốt trên các thang thời gian của việc xả này.

Các mật độ được tích hợp theo đường được thể hiện trên Fig.13b, từ giao thoa kế $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ 6 cung nằm tại $z = 0$. Xem xét việc dịch chuyển FRC thẳng đứng (y), như được đo bởi việc chụp cắt lát của nhiệt bức xạ kế, việc đảo Abel tạo ra các đường viền mật độ của các Fig.13c. Sau một số cú đánh mạnh theo hướng trục và hướng kính trong suốt 0,1ms đầu tiên, FRC ổn định với biên dạng mật độ rộng. Biên dạng này là tương đối

phẳng, với mật độ chính trên trục, như được biểu cầu bởi cân bằng 2-D FRC thông thường.

Tổng nhiệt độ plasma được thể hiện trên Fig.13d, được dẫn ra từ cân bằng áp suất và hoàn toàn thống nhất với các đo đặc tán xạ và quang phổ Thomson.

Phân tích từ toàn bộ mảng thông lượng bị loại trừ chỉ thị rằng hình dạng của bộ phận tách FRC (được xấp xỉ bởi các biên dạng theo trục thông lượng bị loại trừ) phát triển đều đặn từ dạng đường chạy tới dạng hình elip. Việc phát triển này, như được thể hiện trên Fig.14, là thống nhất với việc tái kết nối từ tính đều đặn từ hai thành một FRC đơn. Thực sự là, các ước lượng thô đề xuất rằng thời điểm cụ thể này khoảng 10% của hai thông lượng từ RFC khởi tạo sẽ tái kết nối trong khi va chạm.

Chiều dài FRC co lại đều đặn từ 3m xuống khoảng 1m trong suốt thời gian sống của FRC. Việc co rút này, nhìn thấy được trên Fig.14, đề xuất rằng hầu hết tổn thất năng lượng đối lưu gây ảnh hưởng lớn tới việc giam FRC. Khi áp suất plasma bên trong bộ phận tách giảm nhanh hơn áp suất từ tính bên ngoài, thì ứng suất đường sức từ trong các vùng kết thúc nén FRC theo hướng trục, phục hồi cân bằng theo hướng trục và hướng kính. Với việc xả được thảo luận trong các Fig.13 và Fig.14, thông lượng từ FRC, tồn trữ hạt, và nhiệt năng (khoảng 10mWb, 7×10^{19} hạt, và 7kJ, một cách tương ứng) được giảm mạnh theo bậc của biên độ trong mili giây thứ nhất, khi cân bằng FRC xuất hiện để giảm xuống.

Việc vận hành được chống đỡ - Chế độ HPF

Các ví dụ trên các hình vẽ Fig.12 đến Fig.14 là đặc trưng của FRC phân rã mà không có bất kỳ sự chống đỡ nào. Tuy nhiên, nhiều kỹ thuật đã được phát triển trên hệ thống FRC 10 để tiếp tục cải tiến việc giam FRC (lõi bên trong và lớp cạnh) cho chế độ HPF và chống đỡ cho cấu hình.

Các chùm trung hòa

Đầu tiên, (H) phần trung hòa nhanh được phun vuông góc vào B_z trong các chùm từ tám bộ phận phun chùm trung hòa 600. Các chùm của các phần trung hòa nhanh được phun từ thời điểm các phần hình thành FRC bắc và nam hợp nhất trong buồng giam 100 thành một FRC 450. Các ion nhanh, được tạo chủ yếu bởi việc trao đổi điện tích, có các

quỹ đạo betatron (với bán kính sơ cấp trên thang của cấu trúc liên kết FRC hoặc ít nhất là lớn hơn nhiều so với thang chiều dài độ dốc từ trường đặc trưng) thêm vào dòng theo phương vị của FRC 450. Sau một số phần của việc xả (sau 0,5ms đến 0,8ms vào trong một lần bắn), phân bố ion nhanh đủ lớn cải thiện một cách đáng kể các tính chất độ ổn định và giam của FRC bên trong (xem, ví dụ M.W. Binderbauer and N. Rostoker, Plasma Phys. **56**, part 3, 451 (1996)). Hơn nữa, từ khía cạnh được chống đỡ, các chùm từ các bộ phận phun chùm trung hòa 600 cũng là các phương tiện sơ cấp để dẫn dòng và gia nhiệt cho plasma FRC.

Trong chế độ plasma của hệ thống FRC 10, các ion nhanh giảm tốc chủ yếu là trên các điện tử plasma. Trong suốt phần đầu của việc xả, các thời gian giảm tốc được trung bình hóa cho quỹ đạo của các ion nhanh là 0,3 – 0,5ms, tạo thành việc gia nhiệt FRC đáng kể, chủ yếu là của các điện tử. Các ion nhanh tạo ra việc lệch lớn theo hướng kính ra bên ngoài bộ phận tách do từ trường FRC bên trong vốn đã thấp (trung bình khoảng 0,03T cho trường theo trục bên ngoài 0,1T). Các ion nhanh sẽ bị tổn thương cho tổn thất trao đổi nạp, nếu mật độ khí trung hòa là quá lớn ở bên ngoài bộ phận tách. Do đó, việc khử khí thành và các kỹ thuật khác (như súng plasma 350 và các chốt cấm gương 440 đóng góp, bên cạnh các phần khác, vào việc điều khiển khí) được triển khai trên hệ thống FRC 10 có xu hướng tối thiểu hóa các phần trung hòa cạnh và cho phép tạo dòng ion nhanh cần thiết.

Việc phun hạt

Khi phân bố ion nhanh đáng kể được tạo ra trong FRC 450, với các nhiệt độ điện tử cao hơn và các thời gian sống FRC dài hơn, các hạt H hoặc D được đóng băng được phun vào trong FRC 450 từ bộ phận phun hạt 700 để chống đỡ tồn trữ hạt FRC của FRC 450. Các thang thời gian tiêu mòn thấy trước là đủ ngắn để tạo ra nguồn hạt FRC đáng kể. Tỷ lệ này cũng có thể được tăng bởi việc phóng đại diện tích bề mặt của mảnh được phun bằng cách phá vỡ các hạt riêng rẽ thành các phần vỡ nhỏ hơn trong khi ở trong các thùng hoặc các ống phun của bộ phận phun hạt 700 và trước khi đi vào buồng giam 100, bước này có thể đạt được bằng cách tăng ma sát giữa hạt và các thành của ống phun bằng cách xiết chặt bán kính gấp của phần cuối cùng của ống phun ngay trước khi đi vào trong buồng giam 100. Theo việc thay đổi trình tự bắn và tỉ lệ của 12 thùng (các ống phun)

cũng như việc phân mảnh, có thể điều chỉnh hệ thống phun hạt 700 để chỉ tạo ra mức mong muốn của việc chống đỡ tồn trữ hạt. Đến lượt nó, nó giúp duy trì áp suất động lực bên trong trong FRC 450 và việc vận hành được chống đỡ và thời gian sống của FRC 450.

Khi các nguyên tử bị tan mòn gặp plasma đáng kể trong FRC 450, chúng trở nên được ion hóa hoàn toàn. Sau đó, thành phần plasma lạnh tạo thành được gia nhiệt theo va chạm bởi plasma FRC bản địa. Năng lượng cần thiết để duy trì nhiệt độ FRC mong muốn được cung cấp cuối cùng bởi các bộ phận phun chùm 600. Theo nghĩa này, các bộ phận phun hạt 700 cùng với các bộ phận phun chùm trung hòa 600 tạo thành hệ thống duy trì trạng thái ổn định và chống đỡ FRC 450.

Việc phun CT

Như một phương án thay thế cho bộ phun hạt, bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT) được tạo ra, chủ yếu để nạp liệu các plasma cấu hình được đảo trường (field-reversed configuration - FRC). Bộ phận phun CT 720 chứa súng plasma đồng trục được từ hóa (magnetized coaxial plasma-gun - MCPG), mà, như được thể hiện trên Fig.21, chứa các điện cực bên trong và bên ngoài hình trụ đồng trục 722 và 724, cuộn dịch chuyển được định vị bên trong của điện cực bên trong 726 và bộ phận ngắt điện 728 trên đầu cuối đối diện với việc xả của bộ phận phun CT 720. Khí được phun vào qua cổng phun khí 730 vào trong không gian giữa các điện cực bên trong và bên ngoài 722 và 724 và plasma dạng Spheromak được sinh ra ở đó bằng cách xả và đẩy ra từ súng bởi lực Lorentz. Như được thể hiện trên các hình vẽ Fig.22A và Fig.22B, cặp các bộ phận phun CT 720 được ghép nối với bể giam giữ 100 gần trên các cạnh đối diện của mặt phẳng giữa của bể 100 để phun các CT vào trong plasma FRC trung tâm nằm trong bể giam giữ 100. Đầu cuối xả của các bộ phận phun CT 720 được hướng về phía mặt phẳng giữa của bể giam giữ 100 tại góc so với trục dài của bể giam giữ 100 tương tự với các bộ phận phun chùm trung tính 615.

Theo các phương án thực hiện khác, bộ phận phun CT 720, như được thể hiện trên các hình vẽ Fig.23A và Fig.23B, chứa ống trôi dạt 740 chứa ống hình trụ kéo dài được ghép nối với đầu cuối xả của bộ phận phun CT 720. Như được mô tả, ống trôi dạt 740

chứa các cuộn ống trôi dạt 742 được định vị quanh và tách biệt theo hướng trục dọc theo ống. Nhiều cổng chắn đoán 744 được mô tả dọc theo chiều dài của ống.

Các ưu điểm của bộ phận phun CT 720 là: (1) điều khiển và có khả năng điều chỉnh lượng tồn của các hạt cho mỗi CT được phun; (2) plasma ấm được lắng đọng (thay cho các hạt đông lạnh); (3) hệ thống có thể được vận hành trong chế độ rep-rate để cho phép nạp liệu liên tục; (4) hệ thống cũng có thể phục hồi thông lượng từ như các CT được phun mang từ trường được nhúng. Theo phương án thực hiện của việc sử dụng làm thí nghiệm, đường kính trong của điện cực bên ngoài là 83,1mm và đường kính ngoài của điện cực bên trong là 54,0mm. Bề mặt của điện cực bên trong 722 sẽ tốt hơn nếu được phủ bằng vonfram để làm giảm việc các tạp chất đi ra khỏi điện cực 722. Như được mô tả, cuộn dịch chuyển 726 được gắn bên trong điện cực trong 722.

Theo các thí nghiệm hiện tại, có thể đạt được tốc độ dịch chuyển CT siêu âm lên tới $\sim 100\text{km/s}$. Các thông số plasma thông thường khác là như sau: mật độ điện tử $\sim 5 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$, nhiệt độ điện tử $\sim 30\text{--}50\text{eV}$, lượng dư của hạt là $\sim 0,5\text{--}1,0 \times 10^{19}$. Áp suất động năng cao của CT cho phép plasma được phun vào thâm nhập sâu vào trong FRC và lắng đọng các hạt bên trong bộ phận tách. Trong các thí nghiệm hiện tại, việc nạp liệu hạt FRC tạo thành $\sim 10\text{--}20\%$ là lượng dư hạt FRC được tạo ra bởi các bộ phận phun CT thể hiện thành công việc nạp liệu có thể được thực hiện mà không làm gián đoạn plasma FRC.

Các cuộn dây hình yên ngựa

Để đạt được việc dẫn dòng trạng thái ổn định và duy trì dòng ion cần thiết, mong muốn là phải hạn chế hoặc làm giảm một cách đáng kể việc quay tròn lên của điện tử do lực ma sát điện tử-ion (tạo thành từ việc truyền động năng và chạm ion điện tử). Hệ thống FRC 10 sử dụng kỹ thuật mới để tạo ra việc phá vỡ điện tử thông qua trường lưỡng cực hoặc tứ cực từ tĩnh được áp dụng từ bên ngoài. Điều này được hoàn thiện thông qua các cuộn dây hình yên ngựa bên ngoài 460 được mô tả trên Fig.15. Từ trường theo hướng kính được tác dụng theo phương ngang từ các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra điện trường theo hướng trục trong plasma FRC quay. Dòng điện tử theo hướng trục được tạo thành tương tác với từ trường theo hướng kính để tạo ra lực phá vỡ theo phương vị trên các điện tử, $F_\theta = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$. Với điều kiện thông thường trong hệ thống FRC 10, trường lưỡng cực (hoặc tứ cực) từ tính được áp dụng được yêu cầu nằm trong plasma chỉ cần ở

cỡ 0,001T để tạo ra việc phá vỡ điện tử tương xứng. Trường bên ngoài tương ứng khoảng 0.015 T là đủ nhỏ để không làm cho các hạt nhanh có giá trị bị mất, hoặc theo cách khác, là gây ảnh hưởng xấu tới việc giam. Thực tế, trường lưỡng cực (hoặc tứ cực) từ tính được áp dụng đóng góp vào việc làm kim nén độ mất ổn định. Kết hợp với việc phun chùm trung hòa theo tiếp tuyến và việc phun plasma theo hướng trục, các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra mức điều khiển bổ sung liên quan với việc duy trì và độ ổn định dòng.

Các chốt cấm gương

Thiết kế của các cuộn dây được tạo xung 444 nằm trong các chốt cấm gương 440 cho phép tạo cục bộ các từ trường cao (2T tới 4 T) với tổng năng lượng vừa phải (khoảng 100 kJ). Đối với việc hình thành của các từ trường thông thường của việc vận hành hiện tại của hệ thống FRC 10, tất cả các đường sức trường nằm trong thể tích hình thành được chuyển qua các phần thất vào 442 tại các chốt cấm gương 440, như được đề xuất bởi các đường sức từ trường trên Fig.2 và tiếp xúc thành plasma sẽ không xuất hiện. Ngoài ra, các chốt cấm gương 440 trong bố trí trước sau với các nam châm bộ chuyển hướng gần như là dc 416 có thể được điều chỉnh để dẫn hướng các đường sức trường lên trên các điện cực chuyển hướng 910, hoặc làm loe các đường sức trường trong cấu hình đỉnh, cuối (không được thể hiện). Phần sau cải thiện độ ổn định và làm giảm cảm ứng nhiệt điện tử song song.

Các chốt cấm gương 440 tự bản thân chúng cũng đóng góp vào việc điều khiển khí trung hòa. Các chốt cấm gương 440 cho phép sử dụng tốt hơn khí đơteri được phụt vào trong các ống thạch anh trong khi hình thành FRC, khi khí ngược dòng vào trong các bộ chuyển hướng 300 được giảm một cách đáng kể bởi độ dẫn khí nhỏ của các chốt (lớn 500L/s). Hầu hết khí được phụt vào còn lại bên trong các ống hình thành 210 sẽ nhanh chóng được ion hóa. Ngoài ra, luồng chảy plasma mật độ cao qua các chốt cấm gương 440 tạo ra việc ion hóa trung hòa một cách hiệu quả do đó tạo thành bộ phận chắn khí hiệu quả. Kết quả là, hầu hết các phần trung hòa được tái chế trong các bộ chuyển hướng 300 từ lớp cạnh FRC 456 không quay trở buồng giam 100. Ngoài ra, các phần trung hòa được kết hợp với việc hoạt động của các súng plasma 350 (như được thảo luận bên dưới) sẽ hầu như bị nhốt vào các bộ chuyển hướng 300.

Cuối cùng, các chốt cấm gương 440 có xu hướng cải thiện việc giam lớp cạnh FRC. Với các tỉ lệ gương (các từ trường chốt/giam) trong khoảng giới hạn từ 20 đến 40, và với chiều dài 15m giữa các chốt cấm gương bắc và nam 440, thời gian giam hạt ở lớp cạnh $\tau_{\parallel}$ tăng bởi khoảng lên tới cỡ biên độ. Việc cải thiện $\tau_{\parallel}$ sẵn sàng làm tăng việc giam hạt FRC.

Giả sử rằng tổn thất hạt phân tán theo hướng kính (D) từ thể tích của bộ phận tách 453 được làm cân bằng bởi tổn thất theo trục ($\tau_{\parallel}$) từ lớp cạnh 456, có thể thu được $(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s / \tau_{\parallel})$, mà từ đó chiều dài độ dốc mật độ của bộ phận tách có thể được viết lại như là $\delta = (D \tau_{\parallel})^{1/2}$. Ở đây r_s , L_s và n_s là các bán kính của bộ phận tách, chiều dài bộ phận tách và mật độ của bộ phận tách một cách tương ứng. Thời gian giam hạt FRC $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$, trong đó $\tau_{\perp} = a^2 / D$ với $a = r_s / 4$. Theo nghĩa vật lý, việc cải thiện $\tau_{\parallel}$ dẫn tới δ được tăng (độ dốc mật độ của bộ phận tách bị giảm thông số trôi dạt), và, do đó, tổn thất hạt FRC được làm giảm. Cải tiến tổng thể trong việc giam hạt FRC thường nhỏ hơn bậc hai do n_s tăng với $\tau_{\parallel}$.

Cải thiện đáng kể trong $\tau_{\parallel}$ cũng yêu cầu là lớp cạnh 456 giữ được ổn định tổng thể (tức là, số $n = 1$ đường rãnh, ống chứa cháy, hoặc tính không ổn định MHD khác thông thường của các hệ thống mở). Việc sử dụng của các súng plasma 350 tạo ra độ ổn định cạnh được ưu tiên này. Theo nghĩa này, các chốt cấm gương 440 và súng plasma 350 tạo thành hệ thống điều khiển cạnh hiệu quả.

Các súng plasma

Các súng plasma 350 cải thiện độ ổn định của các luồng phun xả FRC 454 bằng cách xiết chặt đường. Plasma súng từ các súng plasma 350 được sinh ra mà không có động lượng góc phương vị, chứng minh được việc sử dụng hiệu quả trong việc điều khiển các tính bất ổn quay FRC. Do vậy, các súng 350 là các phương tiện hiệu quả để điều khiển tính bất ổn của FRC mà không cần phải có kỹ thuật ổn định tứ cực cũ hơn. Kết quả là, các súng plasma 350 làm cho nó có thể thu được lợi thế của các hiệu ứng có lợi của các hạt nhanh hoặc truy cập chế độ FRC động lực lai cải tiến như được chỉ ra trong phần mô tả này. Do đó, các súng plasma 350 cho phép hệ thống FRC 10 có thể được vận

hành với các dòng cuộn dây yên ngựa tương ứng cho việc phá vỡ điện tử nhưng bên dưới ngưỡng gây ra độ bất ổn FRC và/hoặc dẫn tới việc phân tán hạt nhanh mạnh mẽ.

Như được đề cập tới trong thảo luận chốt cắm gương (*Mirror Plug*) nêu trên, nếu $\tau_{\parallel}$ có thể được cải thiện một cách đáng kể, plasma súng được cung cấp có thể so sánh được với tỉ lệ tổn thất hạt lớp cạnh ($\sim 10^{22}$ /s). Thời gian sống của plasma được tạo ra bởi súng trong hệ thống FRC 10 là trong khoảng cỡ mili giây. Thực vậy, xem xét plasma được tạo bởi súng với mật độ density $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ và nhiệt độ ion khoảng 200eV, bị giam giữa các chốt cắm gương cuối 440. Chiều dài bẫy L và tỉ lệ gương R một cách tương ứng là khoảng 15m và 20. Đường tự do trung bình của ion do va chạm Coulomb là $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$ và, do $\lambda_{ii} \ln R / R < L$, nên các ion bị nhốt trong chế độ khí-động. Thời gian giam plasma trong chế độ này là $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ ms}$, trong đó V_s là tốc độ âm thanh ion. Để so sánh, thời gian giam ion truyền thống cho các thông số plasma này nên là $\tau_c \sim 0.5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7 \text{ ms}$. Việc phân tán ngang dị thường này có thể, theo nguyên tắc, làm ngắn thời gian giam plasma. Tuy nhiên, trong hệ thống FRC 10, nếu giả sử rằng tỉ lệ khuếch tán Bohm, thời gian giam ngang được ước lượng cho plasma được tạo bởi súng là $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ ms}$. Do đó, các súng sẽ tạo ra việc nạp lại nhiên liệu một cách đáng kể của lớp cạnh FRC 456, và việc giam hạt FRC tổng hợp được cải thiện.

Ngoài ra, các luồng plasma từ súng có thể được bật lên trong khoảng từ 150 tới 200 mili giây, cho phép sử dụng trong việc khởi động, dịch chuyển và dung hợp FRC vào trong buồng giam 100. Nếu được bật quanh $t \sim 0$ (việc khởi đầu bộ phận trữ chính FRC), các plasma từ súng giúp chống đỡ FRC được tạo thành và được dung hợp theo cách động hiện có 450. Các thành phần dự trữ hạt được kết hợp từ các phần FRC hình thành và từ các súng là tương ứng cho việc bắt giữ chùm trung hòa, gia nhiệt cho plasma, và việc chống đỡ dài. Nếu được bật tại t trong khoảng giới hạn từ -1 đến 0ms, thì các plasma súng có thể điền vào các ống thạch anh 210 với plasma hoặc ion hóa khí được phụt vào trong các ống thạch anh, do đó cho phép hình thành FRC với khí được phụt vào được giảm hoặc thậm chí là không có khí được phụt vào. Phần sau có thể yêu cầu việc tạo thành plasma đủ lạnh để cho phép phân tán nhanh từ trường trôi dạt đảo ngược. Nếu được bật tại thời điểm $t < -2 \text{ ms}$, các luồng plasma có thể điền khoảng từ 1 đến 3 m³ thể tích đường sức trường của các vùng hình thành và giam của các vùng hình thành 200 và

buồng giam 100 với mật độ plasma đích cỡ vài 10^{13} cm^{-3} , đủ để cho phép tạo nên chùm trung hòa trước khi FRC tới. Các FRC hình thành sau đó có thể được tạo thành và được dịch chuyển vào trong plasma bình giam được tạo thành. Theo cách này các súng plasma 350 cho phép tạo ra một dải rộng các điều kiện vận hành và các chế độ thông số.

Việc trôi dạt điện

Việc điều khiển của biên dạng điện trường theo hướng kính trong lớp cạnh 456 là có lợi theo nhiều cách cho khả năng ổn định và giam FRC. Theo các thành phần trôi dạt theo sáng chế được triển khai trong hệ thống FRC 10 có thể áp dụng nhiều phân bố thận trọng của các điện thế cho nhóm các bề mặt thông lượng mở xuyên qua máy từ các vùng bên ngoài vùng giam trung tâm trong buồng giam 100. Theo cách này, các điện trường theo hướng kính có thể được sinh ra qua lớp cạnh 456 ở ngay bên ngoài FRC 450. Các điện trường theo hướng kính sau đó biến đổi việc quay phương vị của lớp cạnh 456 và tác động tới việc giam của nó thông qua vận tốc trượt $E \times B$. Việc quay vị phân bất kỳ giữa lớp cạnh 456 và lõi FRC 453 sau đó có thể được truyền vào phần bên trong của plasma FRC nhờ việc trượt. Kết quả là, việc điều khiển lớp cạnh 456 tác động một cách trực tiếp tới lõi FRC 453. Ngoài ra, do năng lượng tự do trong việc quay plasma cũng có thể chịu trách nhiệm cho việc bất ổn định nên kỹ thuật này tạo ra các phương tiện trực tiếp để điều khiển việc xâm nhập và phát triển của các phần không ổn định. Trong hệ thống FRC 10, việc trôi dạt cạnh thích hợp cung cấp việc điều khiển hiệu quả của việc vận chuyển và quay đường trường mở cũng như việc quay lõi FRC. Vị trí và hình dạng của các điện cực được tạo ra khác nhau 900, 905, 910 và 920 cho phép điều khiển các nhóm khác nhau của các bề mặt thông lượng 455 và tại các thể khác nhau và độc lập. Theo cách này, mảng rộng của các cấu hình điện trường khác nhau và các độ mạnh khác nhau có thể được nhận biết, mỗi phần với đặc trưng khác nhau tác động lên trên hiệu quả hoạt động của plasma.

Ưu điểm chính của tất cả các kỹ thuật trôi dạt mới này là ở chỗ hành vi của plasma lõi và cạnh có thể bị ảnh hưởng tốt từ bên ngoài plasma FRC, tức là không cần phải đem các thành phần vật lý bất kỳ nào tiếp xúc với plasma nóng ở trung tâm (vốn sẽ có nhiều tác động tới các tổn thất năng lượng, thông lượng và các tổn thất hạt). Nó có tác động có lợi chủ yếu lên hiệu quả hoạt động và tất cả các ứng dụng tiềm tàng của khái niệm HPF.

Dữ liệu thực nghiệm - việc hoạt động của HPF

Việc phun của các hạt nhanh thông qua các chùm từ các súng chùm trung hòa 600 đóng vai trò quan trọng trong việc cho phép thực hiện chế độ HPF. Fig.16 minh họa thực tế này. Được mô tả là bộ các đường cong thể hiện cách mà thời gian sống FRC tương quan với chiều dài của các xung của chùm. Tất cả các điều kiện vận hành khác được giữ không đổi cho tất cả các việc xả, bao gồm cả nghiên cứu này. Dữ liệu được trung bình hóa qua nhiều lần bắn, và do đó thể hiện hành vi thông thường. Rõ ràng là khoảng thời gian của chùm dài hơn sẽ tạo ra các FRC sống dài hơn. Xem xét bằng chứng này cũng như các chẩn đoán khác trong nghiên cứu này, nó minh họa rằng các chùm làm tăng độ ổn định và làm giảm các tổn thất. Tương quan giữa chiều dài xung chùm và thời gian sống FRC là không hoàn hảo do việc bắn chùm trở nên không hiệu quả bên dưới kích cỡ plasma cụ thể, tức là, khi FRC 450 co lại trong kích thước vật lý mà không phải tất cả các chùm được phun vào đều bị cắt và bị bắn. Việc co lại của FRC chủ yếu là do thực tế là tổn thất năng lượng thực ($\sim 4\text{MW}$ khoảng ở giữa tới phần xả) từ plasma FRC trong khi xả lớn hơn công suất tổng được nạp vào trong FRC thông qua các chùm trung hòa ($\sim 2,5\text{MW}$) cho thiết lập thực nghiệm cụ thể. Việc định vị các chùm tại vị trí gần với mặt phẳng giữa của bình 100 hơn sẽ có xu hướng làm giảm các tổn thất này và mở rộng thời gian sống của FRC.

Fig.17 minh họa các hiệu quả của các thành phần khác để đạt được chế độ HPF. Nó thể hiện họ các đường cong thông thường mô tả thời gian sống của FRC 450 như là hàm của thời gian. Trong tất cả các trường hợp, lượng vừa phải, không đổi của công suất chùm (khoảng $2,5\text{MW}$) được phun cho toàn bộ khoảng thời gian của từng lần xả. Mỗi đường cong là thể hiện của tổ hợp khác nhau của các thành phần. Ví dụ, việc vận hành của hệ thống FRC 10 mà không có các chốt cấm gương 440, các súng plasma 350 bất kỳ nào hoặc việc khử khí từ các hệ thống khử khí 800 sẽ tạo thành sự xâm nhập nhanh của phần không ổn định quay tròn và tạo thành tổn thất của cấu trúc liên kết FRC. Việc chỉ thêm các chốt cấm gương 440 làm trễ việc xâm nhập của phần không ổn định và làm tăng việc giam hãm. Việc sử dụng tổ hợp của các chốt cấm gương 440 và súng plasma 350 còn làm giảm sự không ổn định và tăng thời gian sống FRC. Cuối cùng, việc khử khí bổ sung (Ti trong trường hợp này) trên đỉnh của súng 350 và các chốt 440 tạo ra các

kết quả tốt nhất – FRC tạo thành không có sự mất ổn định nào và thể hiện thời gian sống dài nhất. Rõ ràng từ minh họa thực nghiệm rằng kết hợp hoàn toàn của các thành phần tạo ra hiệu quả tốt nhất và tạo ra các chùm với các điều kiện đích tốt nhất.

Như được thể hiện trên Fig.1, cơ chế HPF mới được phát hiện thể hiện thành vi vận chuyển được cải thiện một cách mạnh mẽ. Fig.1 minh họa thay đổi trong thời gian giam hạt trong hệ thống FRC 10 giữa cơ chế thông thường và cơ chế HPF. Như có thể được quan sát, nó được cải thiện tốt, vượt quá thông số 5 trong chế độ HPF. Ngoài ra, Fig.1 chi tiết hóa thời gian giam hạt trong hệ thống FRC 10 so với thời gian giam hạt trong các thí nghiệm FRC thông thường trước đó. Liên quan tới các máy khác, chế độ HPF của hệ thống FRC 10 có việc giam được cải tiến nhờ thông số trong khoảng từ 5 và gần tới 20. Cuối cùng và quan trọng nhất, bản chất của việc định cỡ giam của hệ thống FRC 10 trong chế độ HPF là khác biệt một cách đáng kể với tất cả các đo đạc trước kia. Trước khi thiết lập của chế độ HPF trong hệ thống FRC 10, các định luật định cỡ theo kinh nghiệm khác nhau được dẫn ra từ dữ liệu để dự đoán các thời gian giam trong các thí nghiệm FRC trước đó. Tất cả các quy tắc định cỡ này phụ thuộc chủ yếu vào tỉ lệ R^2/ρ_i , trong đó R là bán kính của từ trường bằng không (đo đặc thô của việc định cỡ vật lý của máy) và ρ_i là bán kính larmor ion được nâng lên trong trường được tác dụng từ bên ngoài (đo đặc thô của từ trường được áp dụng). Từ Fig.1, rõ ràng là việc giam dài trong các FRC truyền thống chỉ có thể thực hiện tại máy có kích cỡ lớn và/hoặc từ trường cao. Việc vận hành hệ thống FRC 10 trong CR chế độ FRC thông thường có xu hướng tuân theo các quy tắc định cỡ, như được chỉ ra trên Fig.1. Tuy nhiên, chế độ HPF là vượt trội và có thể thu được việc giam tốt hơn nhiều mà không cần máy có kích cỡ lớn hoặc các từ trường cao. Quan trọng hơn, rõ ràng từ Fig.1 là chế độ HPF tạo thành thời gian giam cải tiến với kích cỡ plasma được làm giảm khi so sánh với chế độ CR. Các xu hướng tương tự cũng có thể được nhìn thấy cho các thời gian giam thông lượng và năng lượng, như được mô tả bên dưới, được tăng quá bởi thông số 3-8 cũng trong hệ thống FRC 10. Do đó, điểm vượt trội của chế độ HPF này là nó cho phép sử dụng công suất chùm vừa phải, các từ trường thấp hơn và kích cỡ nhỏ hơn để chống đỡ và duy trì sự cân bằng FRC trong hệ thống FRC 10 và các máy có năng lượng cao hơn trong tương lai. Cùng với các cải tiến này là có thể thu được các giá thành vận hành và xây dựng thấp, cũng như giảm được độ phức tạp về kỹ thuật.

Với so sánh khác, Fig.18 thể hiện dữ liệu từ việc xả chế độ HPF biểu diễn trong hệ thống FRC 10 như là hàm của thời gian. Fig.18(a) mô tả bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa. Với các thang thời gian dài hơn này, thành thép dẫn không còn tốt cho bộ phận bảo toàn thông lượng và các đầu dò từ tính ở bên trong thành được tăng cường với các đầu dò ở bên ngoài thành để chịu trách nhiệm cho thông lượng từ việc phân tán qua thép. Khi so sánh với hiệu quả hoạt động thông thường trong CR chế độ thông thường, như được thể hiện trên Fig.13, chế độ vận hành theo chế độ HPF thể hiện thời gian sống dài hơn quá 400%.

Dây biểu diễn của vết mật độ được tích hợp của đường được thể hiện trên Fig.18b với phần bù đảo Abel, các đường viền mật độ, trên Fig.18c. Khi so sánh với CR chế độ FRC thông thường, như được thể hiện trên Fig.13, plasma là yên tĩnh hơn trong suốt xung, là chỉ thị của việc vận hành rất ổn định. Mật độ đỉnh cũng thấp hơn một chút trong các lần bắn HPF – đó là kết quả của tổng nhiệt độ plasma cao hơn (lên tới hệ số 2) như được thể hiện trên Fig.18d.

Với việc xả tương ứng được minh họa trên Fig.18, các thời gian giam năng lượng, hạt và thông lượng là 0,5ms, 1ms và 1ms, một cách tương ứng. Tại thời gian tham chiếu 1ms vào trong việc xả, năng lượng plasma được giữ là 2 kJ trong khi các tổn thất là khoảng 4MW, làm cho đích này trở nên rất thích hợp cho việc chống đỡ chùm trung hòa.

Fig.19 tổng hợp tất cả các ưu điểm của chế độ HPF ở dạng của việc định cỡ giam thông lượng HPF thực nghiệm mới được thiết lập. Như có thể thấy trên Fig.19, dựa trên các đo đạc được tiến hành trước và sau $t = 0,5\text{ms}$, ví dụ, $t \leq 0,5\text{ ms}$ và $t > 0,5\text{ ms}$, việc giam thông lượng (và một cách tương tự là việc giam hạt và giam năng lượng) định cỡ với bình phương thô của nhiệt độ điện tử (electron Temperature - T_e) cho bán kính bộ phận tách (r_s) đã cho. Việc định cỡ mạnh mẽ này với lũy thừa dương của T_e (và không phải là lũy thừa âm) được hoàn thiện, trái với phần được thể hiện bởi các Tokamak truyền thống, trong đó việc giam thường tỉ lệ ngược với một số lũy thừa của nhiệt độ điện tử. Biểu thị của việc định cỡ này là kết quả trực tiếp của trạng thái HPF và phân bố ion quỹ đạo lớn (tức là các quỹ đạo trên quy mô của cấu trúc liên kết FRC và/hoặc ít nhất là việc định cỡ chiều dài độ dốc từ trường đặc trưng). Về cơ bản, việc định cỡ mới này về cơ

bản là tạo thuận tiện cho các nhiệt độ vận hành cao và cho phép các lò phản ứng có kích thước tương đối khiêm tốn.

Với các ưu điểm mà chế độ HPF đã thể hiện, có thể thu được khả năng chống đỡ FRC hoặc trạng thái ổn định được dẫn bởi các chùm trung hòa và sử dụng việc phun hạt thích hợp, nghĩa là các thông số plasma toàn cục như năng lượng nhiệt plasma, tổng số các hạt, chiều dài và bán kính plasma cũng như thông lượng từ là có thể chống đỡ được tại các mức hợp lý mà về cơ bản không bị phân hủy. Để so sánh, Fig.20 thể hiện dữ liệu trong vùng A từ việc xả chế độ HPF biểu diễn trong hệ thống FRC 10 như là hàm của thời gian và trong vùng B cho việc xả chế độ HPF biểu diễn được nhô ra trong hệ thống FRC 10 như là hàm của thời gian trong đó FRC 450 được chống đỡ mà không bị phân rã qua khoảng thời gian của xung chùm trung hòa. Với vùng A, các chùm trung hòa với công suất tổng trong khoảng giới hạn từ khoảng 2,5-2,9 MW được phun vào trong FRC 450 cho chiều dài xung chùm hoạt hóa khoảng 6ms. Thời gian sống nghịch từ plasma được mô tả trong vùng A là khoảng 5,2ms. Dữ liệu mới hơn thể hiện là có thể thu được thời gian sống nghịch từ plasma vào khoảng 7,2ms với chiều dài xung chùm hoạt hóa khoảng 7ms.

Như được ghi chú ở trên liên quan tới Fig.16, tương quan giữa chiều dài xung chùm và thời gian sống FRC là không hoàn hảo do việc bẫy chùm trở nên không hiệu quả bên dưới kích cỡ plasma cụ thể, tức là, khi FRC 450 co lại trong kích thước vật lý mà không phải tất cả các chùm được phun vào đều bị cắt và bị bẫy. Việc co lại hoặc phân hủy của FRC chủ yếu là do thực tế là tổn thất năng lượng thực (-4MW khoảng ở giữa tới việc xả) từ plasma FRC trong khi việc xả lớn hơn công suất tổng được nạp vào trong FRC một chút thông qua các chùm trung hòa (-2,5MW) cho thiết lập thực nghiệm cụ thể. Như chú ý với Fig.3C, việc phun chùm được tạo góc từ các súng chùm trung hòa 600 về phía mặt phẳng giữa sẽ cải thiện việc ghép nối chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng trục trong suốt quá trình phun vào. Ngoài ra, việc tiếp liệu hạt thích hợp sẽ duy trì mật độ plasma cần thiết.

Vùng B là kết quả của việc chạy mô phỏng sử dụng chiều dài xung chùm hoạt hóa khoảng 6ms và tổng công suất chùm từ các súng chùm trung hòa 600 lớn hơn khoảng 10MW một chút, trong đó các chùm trung hòa sẽ phun các phần trung hòa H (hoặc D)

với năng lượng hạt khoảng 15 keV. Dòng tương đương được phun bởi từng chùm trong các chùm là khoảng 110 A. Với vùng B, góc phun chùm tới trục thiết bị là khoảng 20° , bán kính đích 0,19 m. Góc phun có thể được thay đổi nằm trong khoảng giới hạn $15^\circ - 25^\circ$. Các chùm được phun trong hướng đồng dòng theo phương vị. Lực theo cạnh cuối cùng cũng như lực theo trục cuối cùng từ việc phun động lượng chùm trung hòa sẽ được làm tối thiểu hóa. Như với vùng A, (H) phần trung hòa nhanh được phun từ các bộ phận phun chùm trung hòa 600 từ thời điểm các phần hình thành FRC bắc và nam hợp nhất trong buồng giam 100 thành một FRC 450.

Các mô phỏng trong đó nền tảng cho vùng B sử dụng các bộ giải Hall-MHD đa chiều cho plasma nền và cho việc cân bằng, các bộ phận giải dựa trên Monte-Carlo hoàn toàn động lực cho các thành phần chùm mạnh mẽ và cho tất cả các xử lý tán xạ, cũng như bộ phận chứa cho các phương trình vận chuyển được kết hợp cho tất cả các mẫu plasma cho các xử lý tổn thất tương tác kiểu mẫu. Các thành phần vận chuyển được hiệu chuẩn theo kinh nghiệm và được định chuẩn bao quát với cơ sở dữ liệu thực nghiệm.

Như được thể hiện bởi vùng B, thời gian sống nghịch từ trạng thái ổn định của FRC 450 sẽ là chiều dài của xung chùm. Tuy nhiên, điều quan trọng cần phải nhớ là vùng B tương quan chủ yếu thể hiện là khi các chùm được tắt thì plasma hoặc FRC bắt đầu phân rã tại thời điểm đó, nhưng không phải là trước thời điểm này. Việc phân rã sẽ là tương tự như việc phân rã đã được quan sát trong khi xả mà không được trợ giúp chùm, có thể là cỡ 1ms vượt quá thời gian tắt chùm - và đơn giản là sự phản chiếu của thời gian phân rã đặc trưng của plasma được dẫn bởi các xử lý tổn thất thuộc về bản chất.

Sáng chế có thể có nhiều biến đổi khác nhau, và các dạng thay thế, dù các ví dụ cụ thể của chúng đã được thể hiện trên các hình vẽ và được mô tả chi tiết ở đây. Tuy nhiên, cần hiểu rằng sáng chế không bị hạn chế vào các dạng cụ thể của các phương pháp được bộc lộ ở đây, mà trái lại, sáng chế nhằm bao gồm tất cả các biến thể, các phương án tương đương và thay thế nằm trong tinh thần và phạm vi bảo hộ của các yêu cầu bảo hộ kèm theo.

Trong phần mô tả nêu trên, chỉ nhằm mục đích minh họa, danh pháp cụ thể được đặt để tạo ra việc hiểu hoàn toàn phần bộc lộ này. Tuy nhiên, người có hiểu biết trung

bình về lĩnh vực sẽ hiểu rằng các chi tiết cụ thể này sẽ không bị yêu cầu trong thực tế áp dụng của các chỉ dẫn của phần bộc lộ này.

Các đặc điểm khác nhau của các ví dụ thể hiện và các yêu cầu bảo hộ phụ thuộc có thể được kết hợp theo cách không đặc trưng và được đánh số rõ ràng để tạo ra nhiều phương án thực hiện hữu dụng bổ sung cho các chỉ dẫn này. Cũng cần chú ý rằng tất cả các khoảng giới hạn trị số hoặc các chỉ thị của của các nhóm của các thực thể bộc lộ mọi trị số trung gian có thể hoặc thực thể trung gian cho mục đích của phần bộc lộ gốc, cũng như cho mục đích hạn chế đối tượng được yêu cầu bảo hộ.

Các hệ thống và phương pháp để sinh ra và duy trì FRC chế độ HPF đã được bộc lộ. Cần hiểu rằng các phương án thực hiện được mô tả ở đây cho mục đích tạo sự rõ ràng và không nên được coi là hạn chế đối tượng bảo hộ của phần được bộc lộ. Các biến thể, sử dụng, thay thế, cải tiến, phương pháp sản xuất khác nhau sẽ không tách khỏi phạm vi hoặc tinh thần của sáng chế này và sẽ là rõ ràng đối với người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực. Ví dụ, người đọc sẽ hiểu rằng thứ tự và kết hợp cụ thể của các bước xử lý được mô tả ở đây chỉ đơn thuần là minh họa, trừ khi được tuyên bố theo cách khác, và sáng chế có thể được thực hiện, sử dụng các bước xử lý khác hoặc bổ sung, hoặc kết hợp khác hoặc theo thứ tự khác của các hoạt động xử lý. Theo ví dụ khác, mỗi đặc điểm của một phương án thực hiện có thể được trộn và được làm phù hợp với các đặc điểm khác được thể hiện trong các phương án thực hiện khác. Các đặc điểm và các quy trình này là đã biết bởi người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực và có thể được tích hợp nếu muốn. Ngoài ra, và rõ ràng là các đặc điểm này có thể được thêm vào hoặc được bớt đi nếu muốn. Do đó, sáng chế không bị giới hạn, ngoại trừ giới hạn vào các yêu cầu bảo hộ kèm theo và các phần tương đương của chúng.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Phương pháp sinh ra và duy trì plasma trong từ trường với cấu hình được đảo trường (field reversed configuration - FRC) bao gồm các bước:

tạo thành FRC quanh plasma trong buồng giam (100) có mặt phẳng giữa theo chiều dài, và

duy trì FRC tại hoặc quanh trị số không đổi mà không bị phân rã bằng cách tiêm các chùm của các nguyên tử trung hòa nhanh từ các bộ phận phum chùm trung hòa (600) vào trong plasma FRC tại góc hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam và đặc trưng ở chỗ phương pháp còn bao gồm các bước:

tiêm các plasma hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT) từ các bộ phận tiêm CT thứ nhất và thứ hai (720) vào trong plasma FRC tại góc hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam, trong đó các bộ phận tiêm CT thứ nhất và thứ hai được định vị trên các phía đối diện của mặt phẳng giữa của buồng giam.

2. Phương pháp theo điểm 1 còn bao gồm một trong hai hoặc cả hai bước sau:

a) sinh ra từ trường nằm trong buồng với các cuộn dây giả DC (412) đang kéo dài quanh buồng, hoặc

b) sinh ra từ trường gương nằm trong các đầu cuối đối diện của buồng với các cuộn dây gương giả DC (420) đang mở rộng quanh các đầu cuối đối diện của buồng.

3. Phương pháp theo điểm 1 hoặc 2 trong đó bước tạo thành FRC bao gồm việc tạo thành phần hình thành FRC trong vùng hình thành (200) được ghép nối tới đầu cuối của buồng giam và tăng tốc FRC tạo thành về phía mặt phẳng giữa của buồng để tạo thành FRC hoặc bao gồm việc tạo thành vùng hình thành thứ nhất và thứ hai được ghép nối với các đầu cuối thứ nhất và thứ hai của buồng giam và tăng tốc các FRC hình thành thứ nhất và thứ hai về phía mặt phẳng giữa của buồng mà tại đó hai FRC hình thành hòa trộn để tạo thành FRC.

4. Phương pháp theo điểm 3 trong đó bước tạo thành FRC bao gồm một trong số việc tạo thành FRC hình thành trong khi tăng tốc FRC hình thành về phía mặt phẳng giữa của

buồng và tạo thành FRC hình thành sau đó tăng tốc FRC hình thành về phía mặt phẳng giữa của buồng.

5. Phương pháp theo điểm 3 còn bao gồm bước dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ của FRC vào trong các bộ phận chuyển hướng (300) được ghép nối với các đầu cuối của các vùng hình thành (200).

6. Phương pháp theo điểm 5 còn bao gồm bước sinh ra từ trường nằm trong các vùng hình thành (200) và các bộ phận chuyển hướng (300) với các cuộn dây giả DC (414, 416) đang mở rộng quanh các vùng hình thành và các bộ phận chuyển hướng.

7. Phương pháp theo điểm 6, còn bao gồm bước: sinh ra từ trường gương giữa các vùng hình thành (200) và các bộ phận chuyển hướng (300) với các cuộn dây gương giả DC (430).

8. Phương pháp theo điểm 7, còn bao gồm bước sinh ra từ trường nút gương nằm trong phần hạn chế giữa các vùng hình thành (200) và các bộ phận chuyển hướng (300) với các cuộn dây nút gương giả DC (444) đang mở rộng quanh phần hạn chế giữa các vùng hình thành và các bộ phận chuyển hướng.

9. Phương pháp theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 1 đến 7 còn bao gồm một trong số các bước sau:

a) sinh ra một trong số từ trường lưỡng cực và từ trường tứ cực nằm trong buồng với các cuộn dây hình yên ngựa (460) được ghép nối tới buồng;

b) điều hòa các bề mặt bên trong của buồng (100), các vùng hình thành (200), và các bộ phận chuyển hướng (300) với hệ thống khử khí (800);

c) điều hòa các bề mặt bên trong của buồng (100), các vùng hình thành (200), và các bộ phận chuyển hướng (300) với hệ thống khử khí (800) trong đó hệ thống khử khí (800) bao gồm một hệ thống trong số hệ thống lắng đọng titan và hệ thống lắng đọng lithi;

d) tiêm plasma theo trục, vào trong FRC từ các súng plasma được gắn theo trục (350);

e) điều khiển biên dạng điện trường theo hướng kính trong lớp cạnh (456) của FRC;
và

f) điều khiển biên dạng điện trường theo hướng kính trong lớp cạnh của FRC trong đó bước điều khiển biên dạng điện trường theo hướng kính trong lớp cạnh của FRC bao gồm việc áp dụng phân bố của điện thế cho nhóm các bề mặt thông lượng mở của FRC với các điện cực trôi.

10. Phương pháp theo điểm 1 trong đó bước tiêm của các plasma CT vào trong plasma FRC tại góc hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam bao gồm việc tiêm các plasma CT tại góc khoảng 15° tới 25° so với pháp tuyến của trục theo chiều dài của buồng giam và hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam.

11. Phương pháp theo điểm 1 trong đó bước tiêm của các plasma CT vào trong plasma FRC tại góc hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam bao gồm việc tiêm các plasma CT trong chế độ rep-rate.

12. Hệ thống (10) để sinh ra và duy trì plasma trong từ trường với cấu hình được đảo trường (field reversed configuration - FRC) bao gồm buồng giam (100), các vùng hình thành FRC (200) đối diện theo hướng kính thứ nhất và thứ hai, được ghép nối tới buồng giam, vùng hình thành bao gồm các hệ thống tạo thành được môđun hóa để sinh ra FRC và dịch chuyển FRC về phía mặt phẳng giữa theo chiều dài của buồng giam, các bộ phận chuyển hướng thứ nhất và thứ hai (300) được ghép nối tới các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, các súng plasma theo trục thứ nhất và thứ hai (350) được ghép nối theo cách vận hành được tới các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam, nhiều bộ phận tiêm chùm nguyên tử trung hòa (600) được ghép nối tới buồng giam và được định hướng để tiêm các chùm nguyên tử trung hòa về phía mặt phẳng giữa của buồng giam tại một góc so với pháp tuyến của trục theo chiều dài của buồng giam, hệ thống từ tính bao gồm nhiều cuộn dây giả DC (412,414,416) được định vị quanh buồng giam, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, bộ thứ nhất và thứ hai của các cuộn dây gương giả DC (420,430) được định vị giữa buồng giam và các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các nút bịt gương thứ nhất và thứ hai (440) được định vị giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống khử khí (800) được

ghép nối tới buồng giam và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, một hoặc nhiều điện cực trôi (900,905,910,920) để dịch chuyển điện bề mặt thông lượng mở của FRC được sinh ra, một hoặc nhiều các điện cực trôi đang được định vị nằm trong một hoặc nhiều của buồng giam, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hai hoặc hơn hai cuộn dây hình yên ngựa (460) được ghép nối tới buồng giam, và đặc trưng ở chỗ hệ thống còn bao gồm:

các bộ phận tiêm hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT) thứ nhất và thứ hai (720) được ghép nối tới buồng giam tại góc hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam, trong đó các bộ phận tiêm CT thứ nhất và thứ hai được định vị trên các phía đối diện của mặt phẳng giữa của buồng giam.

13. Hệ thống (10) theo điểm 12 trong đó hệ thống được đặt cấu hình để sinh ra FRC và duy trì FRC tại hoặc quanh trị số không đổi mà không bị phân rã trong khi các chùm nguyên tử trung hòa được tiêm vào trong FRC.

14. Hệ thống (10) theo điểm 12 hoặc 13, trong đó các nút bật gương thứ nhất và thứ hai (440) bao gồm bộ thứ ba và thứ tư của các cuộn dây gương giữa từng vùng trong số các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai hoặc trong đó các nút bật gương thứ nhất và thứ hai bao gồm bộ thứ ba và thứ tư của các cuộn dây gương giữa từng vùng trong số các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai và từng nút trong số các nút bật gương thứ nhất và thứ hai (440) còn bao gồm bộ các cuộn dây nút bật gương được bọc quanh phần hạn chế trong đường dẫn giữa từng vùng trong số các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

15. Hệ thống (10) theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 12 đến 14 trong đó các hệ thống tạo thành bao gồm nhiều đơn vị công suất và điều khiển được ghép nối tới các bộ phận riêng rẽ của nhiều cụm bẫy (230) để cấp năng lượng cho bộ các cuộn dây của các bộ phận riêng rẽ trong số nhiều cụm bẫy được bọc quanh ống kéo dài của các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai.

16. Hệ thống (10) theo điểm 15, trong đó các bộ phận riêng rẽ của nhiều đơn vị công suất và điều khiển bao gồm hệ thống kích hoạt và điều khiển.

17. Hệ thống (10) theo điểm 16, trong đó các hệ thống kích hoạt và điều khiển của các bộ phận riêng rẽ của nhiều đơn vị công suất và điều khiển là có thể đồng bộ được để cho phép thực hiện việc tạo thành FRC tĩnh mà trong đó FRC được tạo thành và sau đó được tiêm vào hoặc việc hình thành FRC động trong đó FRC được tạo thành và được dịch chuyển một cách đồng thời.

18. Hệ thống (10) theo bất kỳ trong số các điểm từ 12 đến 17 trong đó nhiều bộ phận tiêm chùm nguyên tử trung hòa bao gồm một hoặc nhiều bộ phận tiêm chùm nguyên tử trung hòa nguồn plasma FR và một hoặc nhiều bộ phận tiêm chùm nguyên tử trung hòa phóng điện.

19. Hệ thống (10) theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 12 đến 18 trong đó nhiều bộ phận phun chùm nguyên tử trung hòa được định hướng với đường tiêm là tiếp tuyến với FRC với vùng bắn đích nằm trong bộ phận tách của FRC.

20. Hệ thống (10) theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 12 đến 19 trong đó ít nhất một việc sau được áp dụng:

a) ống kéo dài là ống thạch anh với lớp lót thạch anh;

b) các hệ thống tạo thành được cấp công suất theo dạng xung;

c) hệ thống khử khí bao gồm một hoặc nhiều hệ thống trong số hệ thống lắng đọng titan và hệ thống lắng đọng lithi được đặt cấu hình để phủ các bề mặt quay mặt về phía của buồng giam và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai; và

d) các điện cực trôi chứa một hoặc nhiều thành phần trong số:

i) ít nhất một điện cực điểm (905) được định vị nằm trong buồng chứa để tiếp xúc với các đường sức trường mở,

ii) tập hợp các điện cực hình khuyên (900) giữa buồng giam và các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai để nạp các lớp thông lượng xa cạnh theo cách đối xứng theo phương vị, và

iii) nhiều điện cực được chòng, đồng tâm (910) được định vị trong các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai để nạp nhiều lớp thông lượng đồng tâm, và anôt (920) của các súng plasma để giao cắt với thông lượng mở.

21. Hệ thống theo điểm 12 trong đó các bộ phận tiêm CT thứ nhất và thứ hai được định hướng tại góc khoảng 15° tới 25° so với pháp tuyến của trục theo chiều dài của buồng giam và hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam.
22. Hệ thống theo điểm 12 trong đó các bộ phận tiêm CT thứ nhất và thứ hai được đặt cấu hình để tiêm các plasma CT vào trong plasma FRC trong chế độ rep-rate.

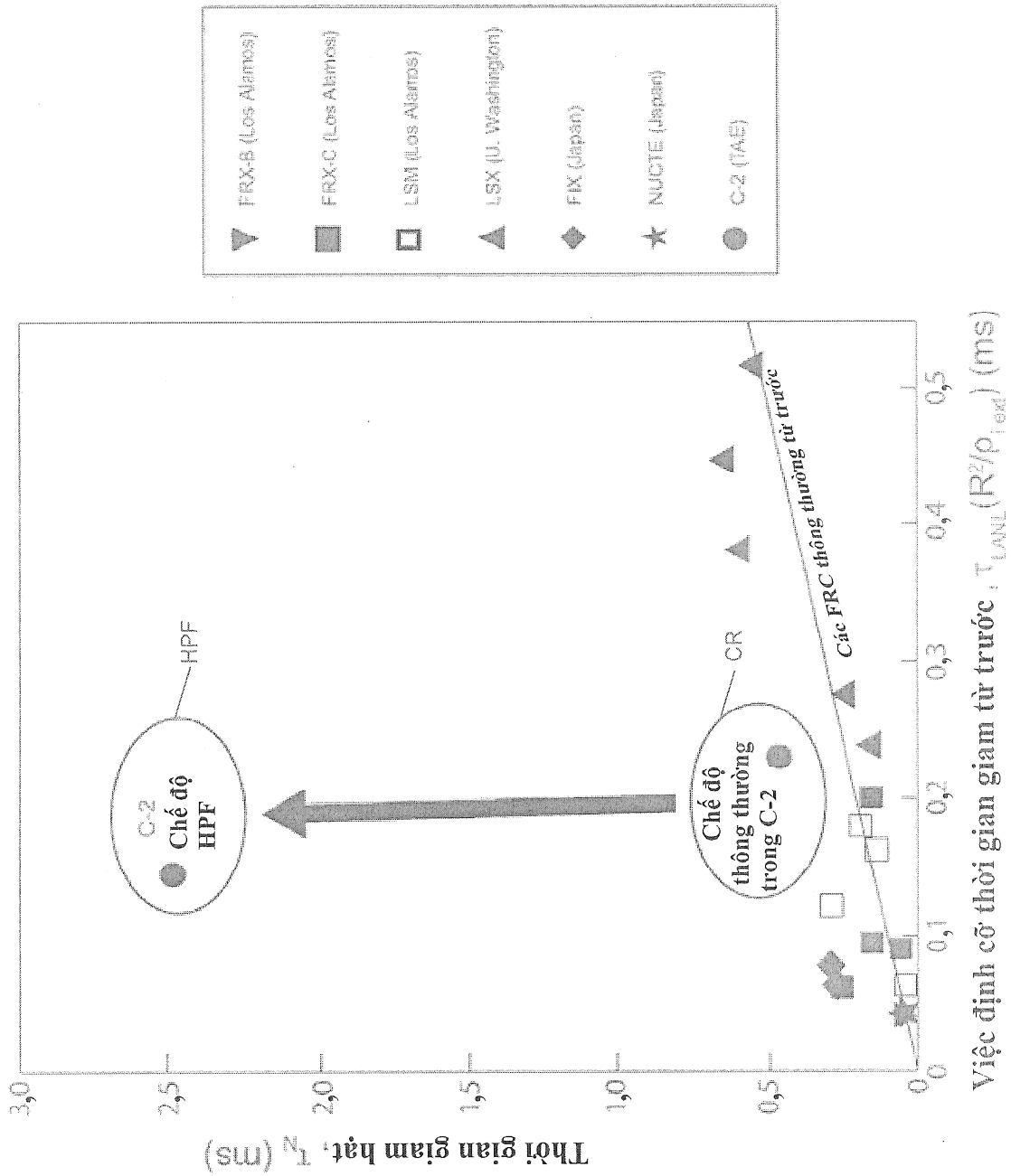


FIG 1

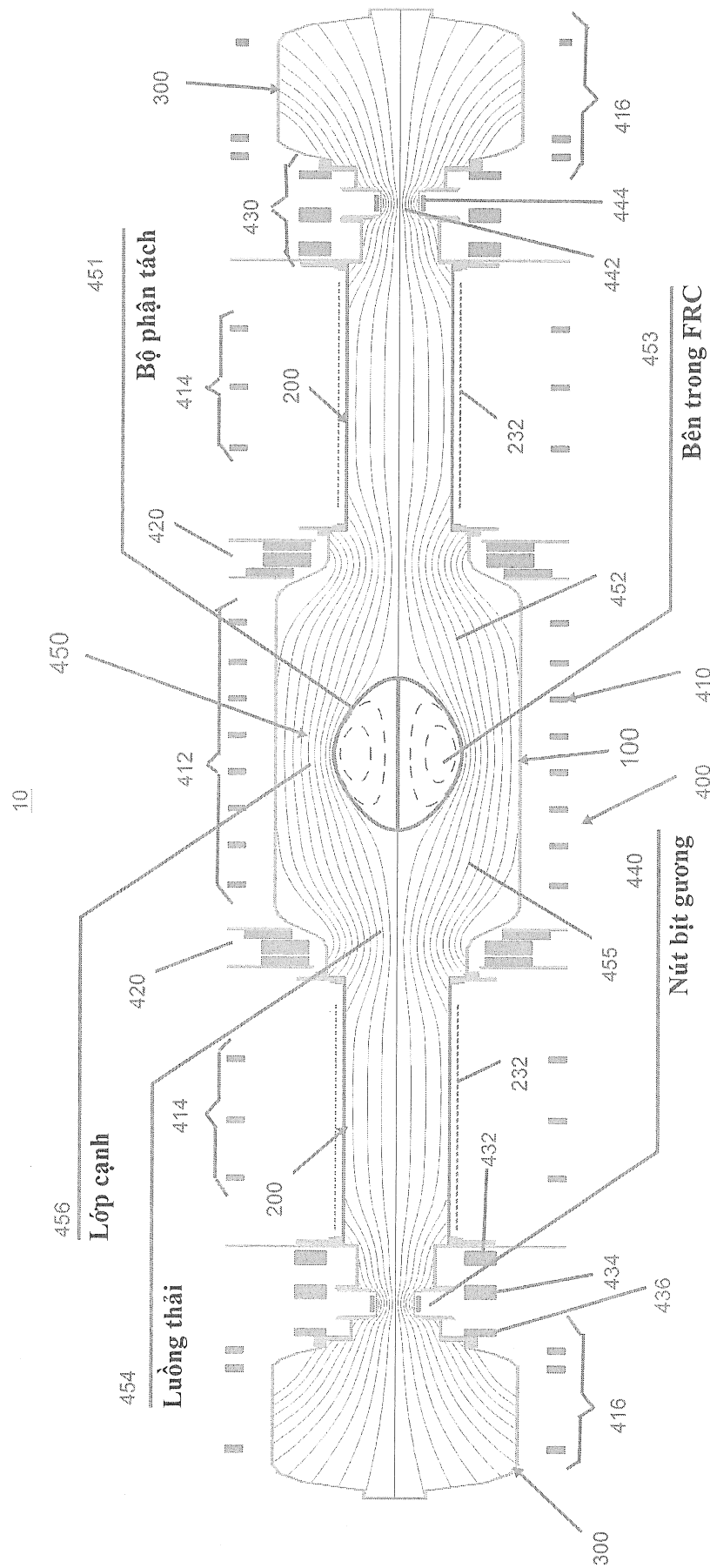


FIG 2

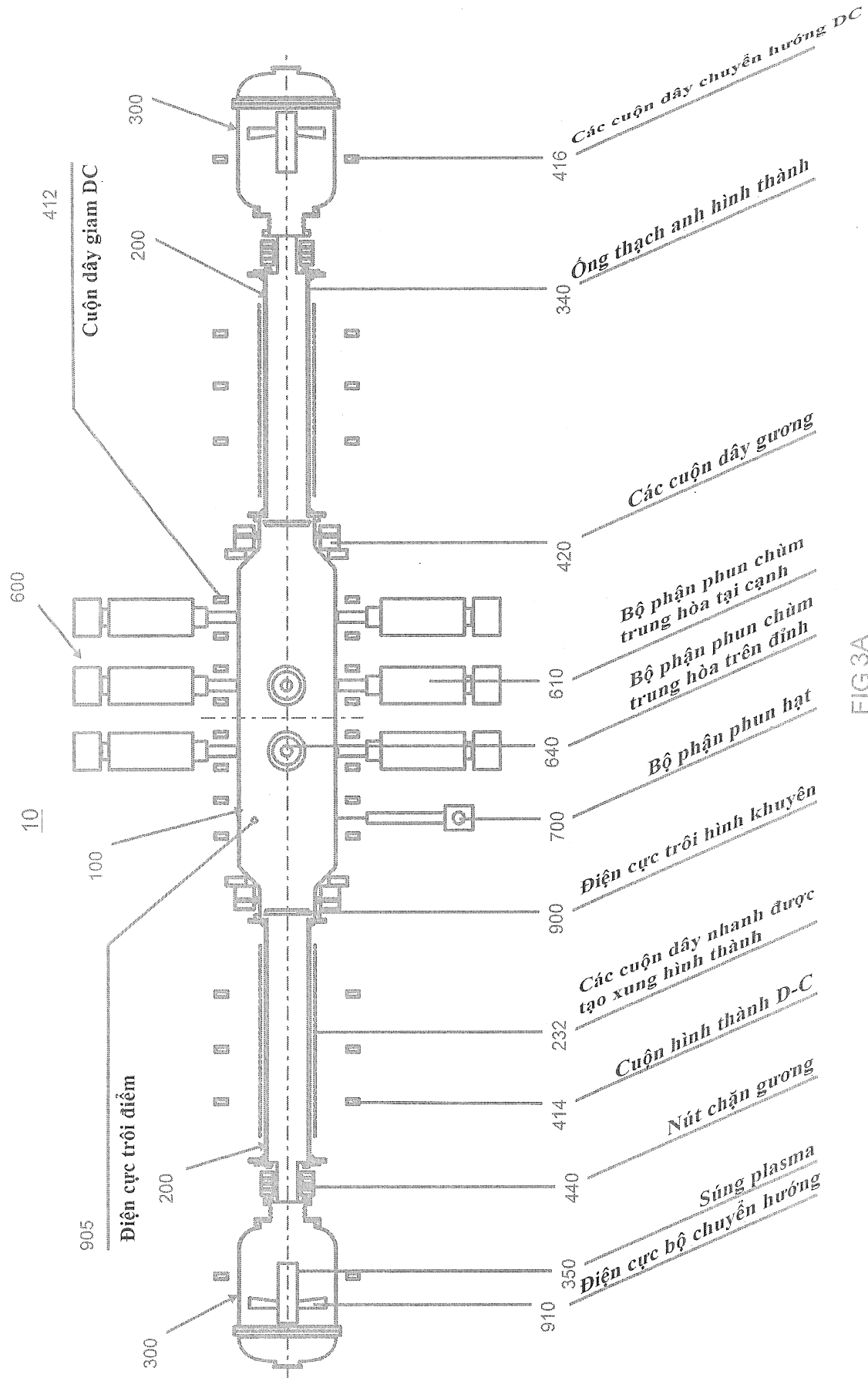


FIG 3A

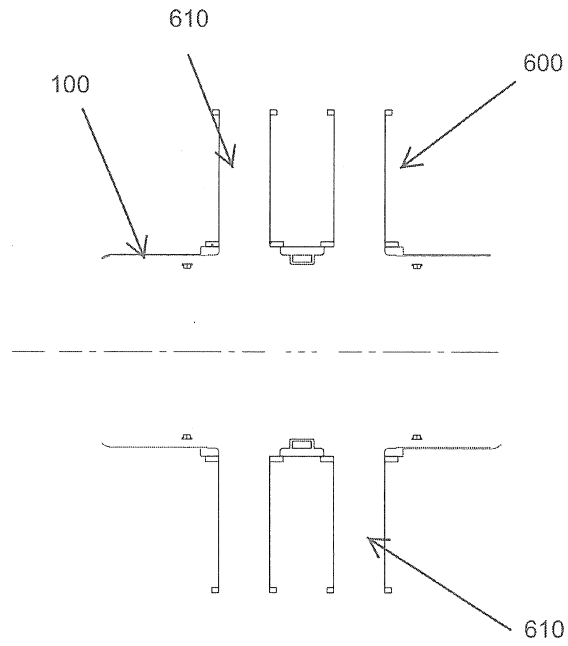


FIG 3B

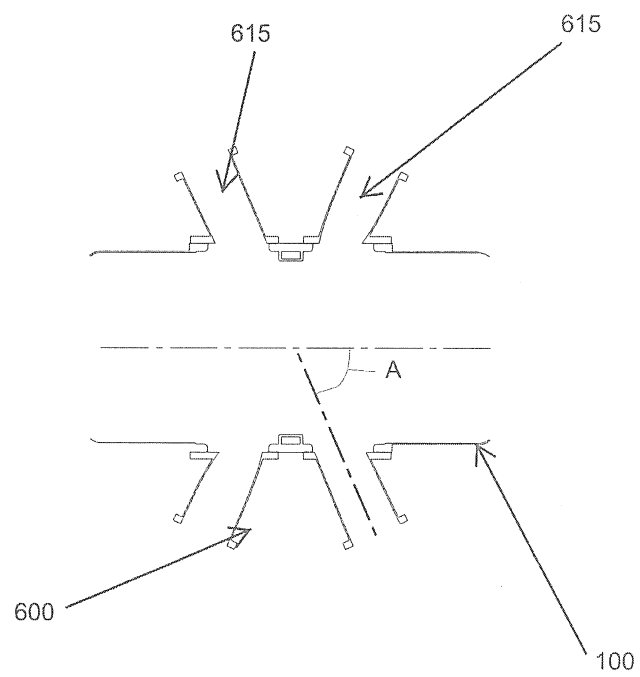


FIG 3C

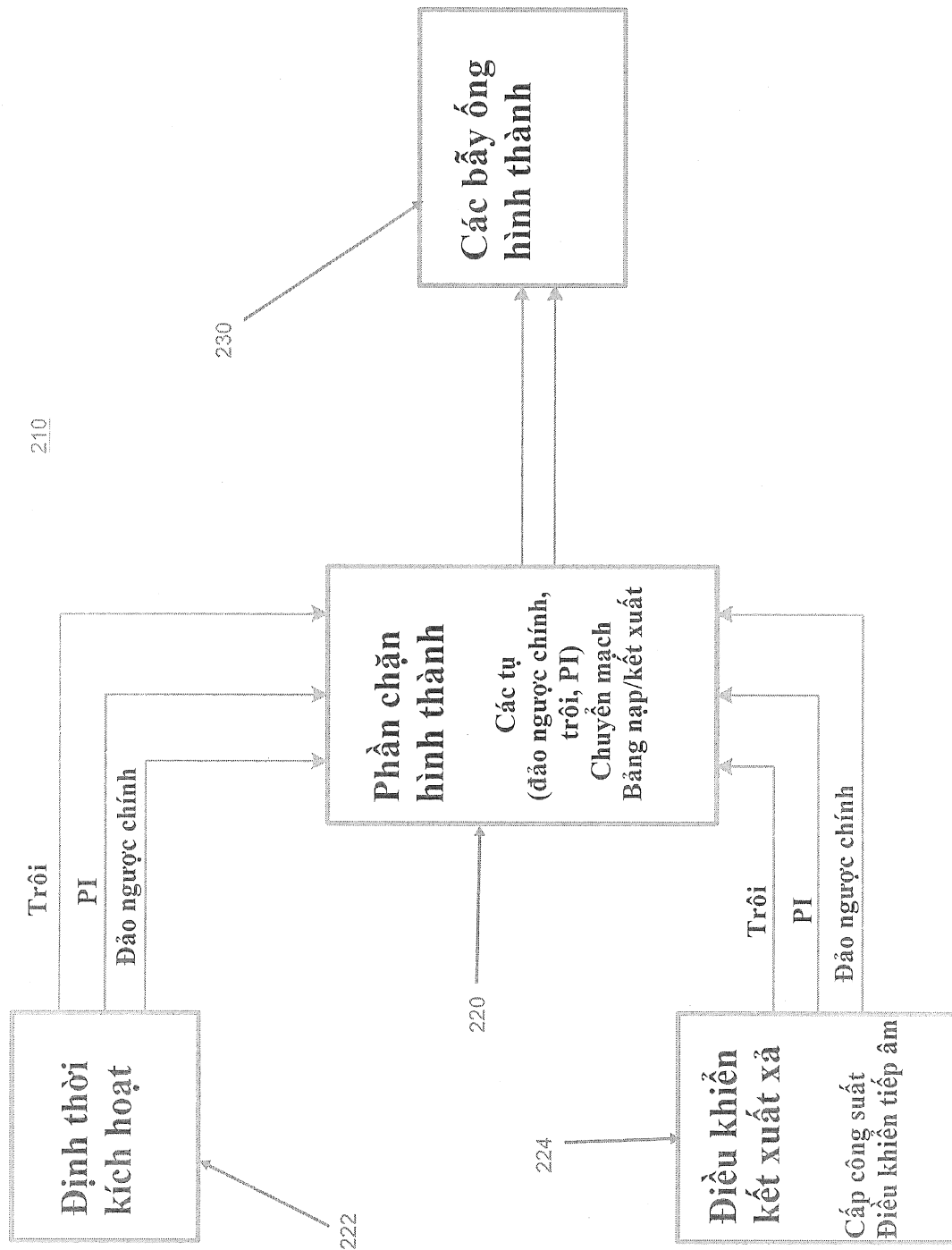
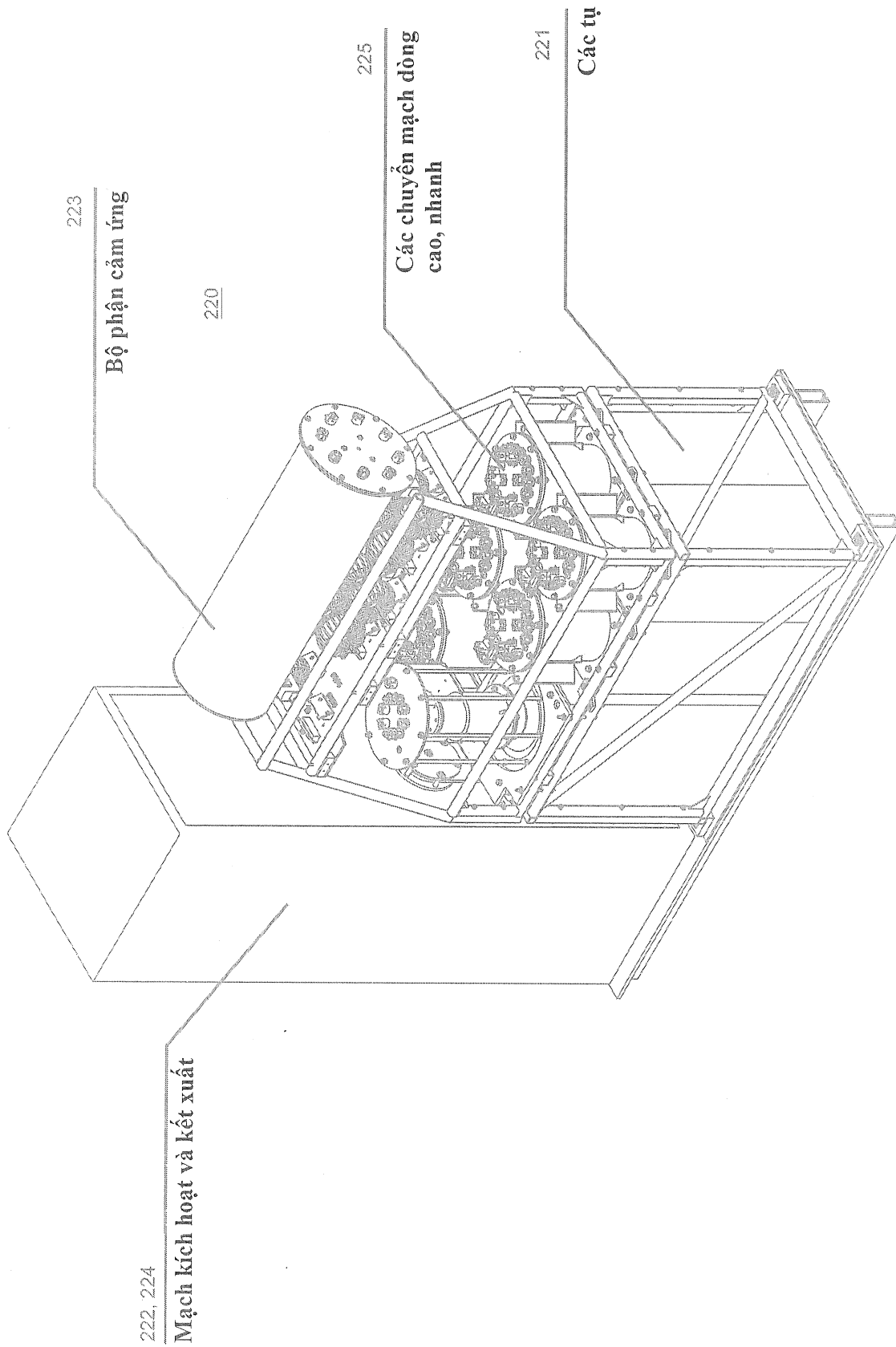


FIG 4



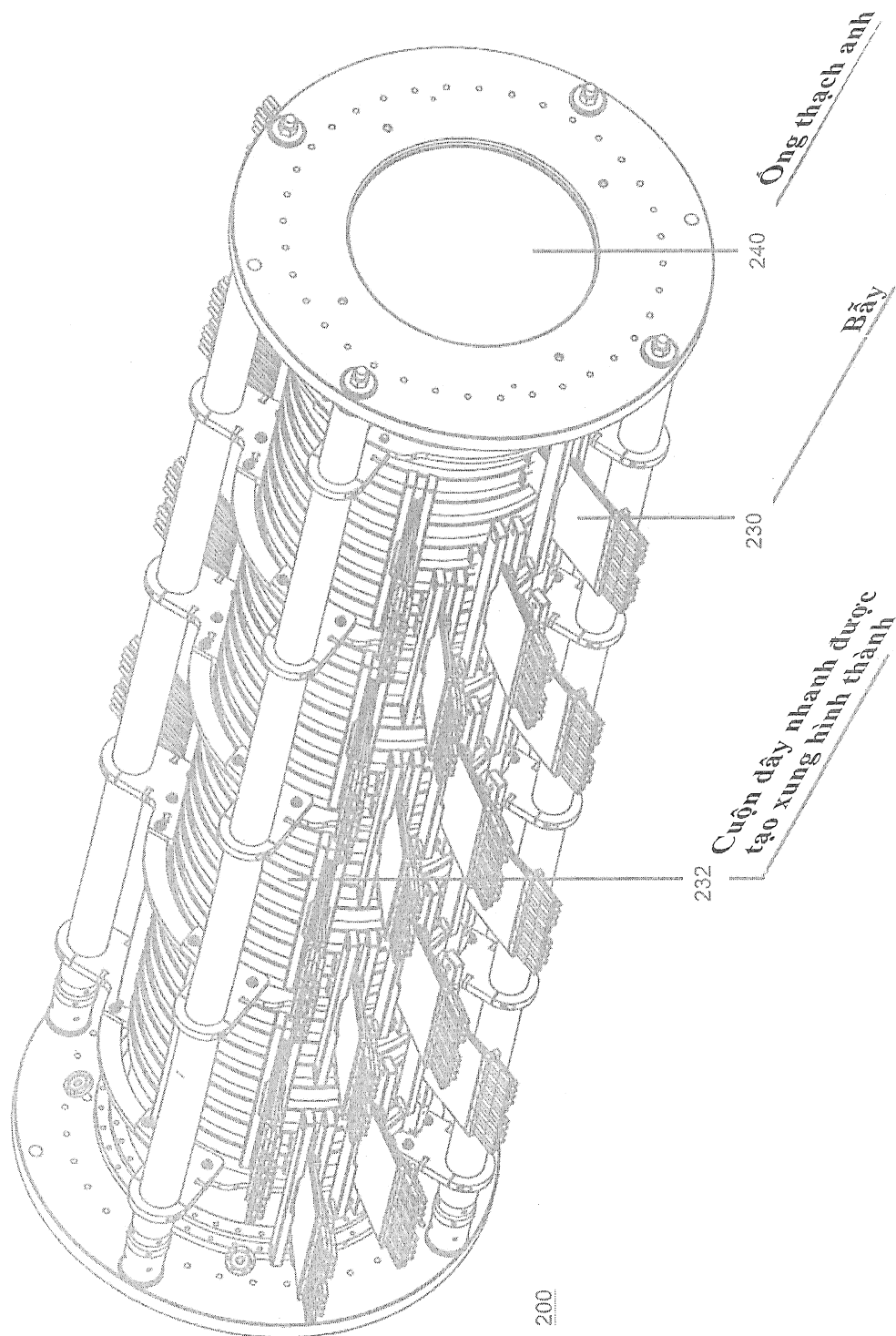


FIG 6

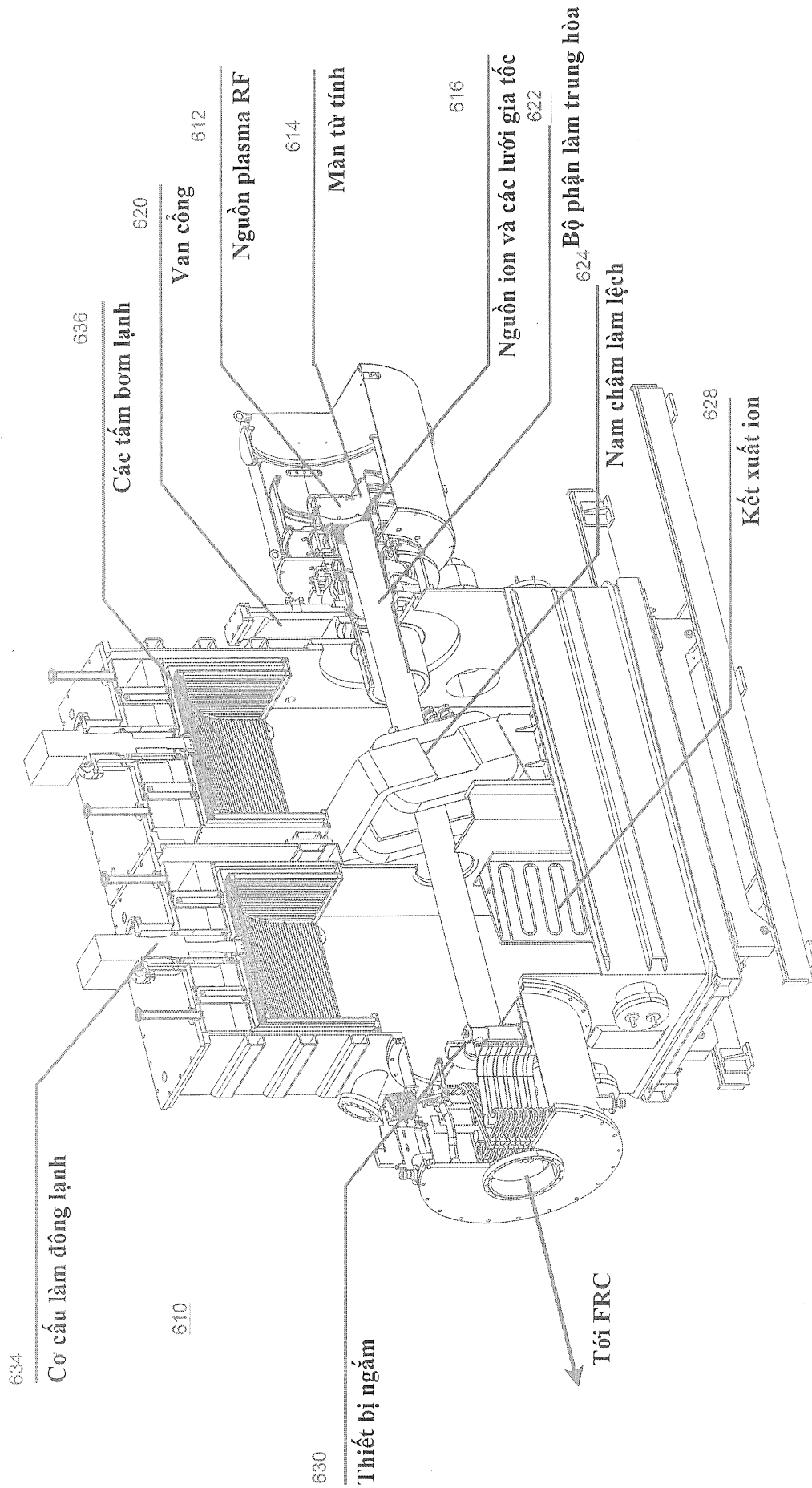


FIG 7

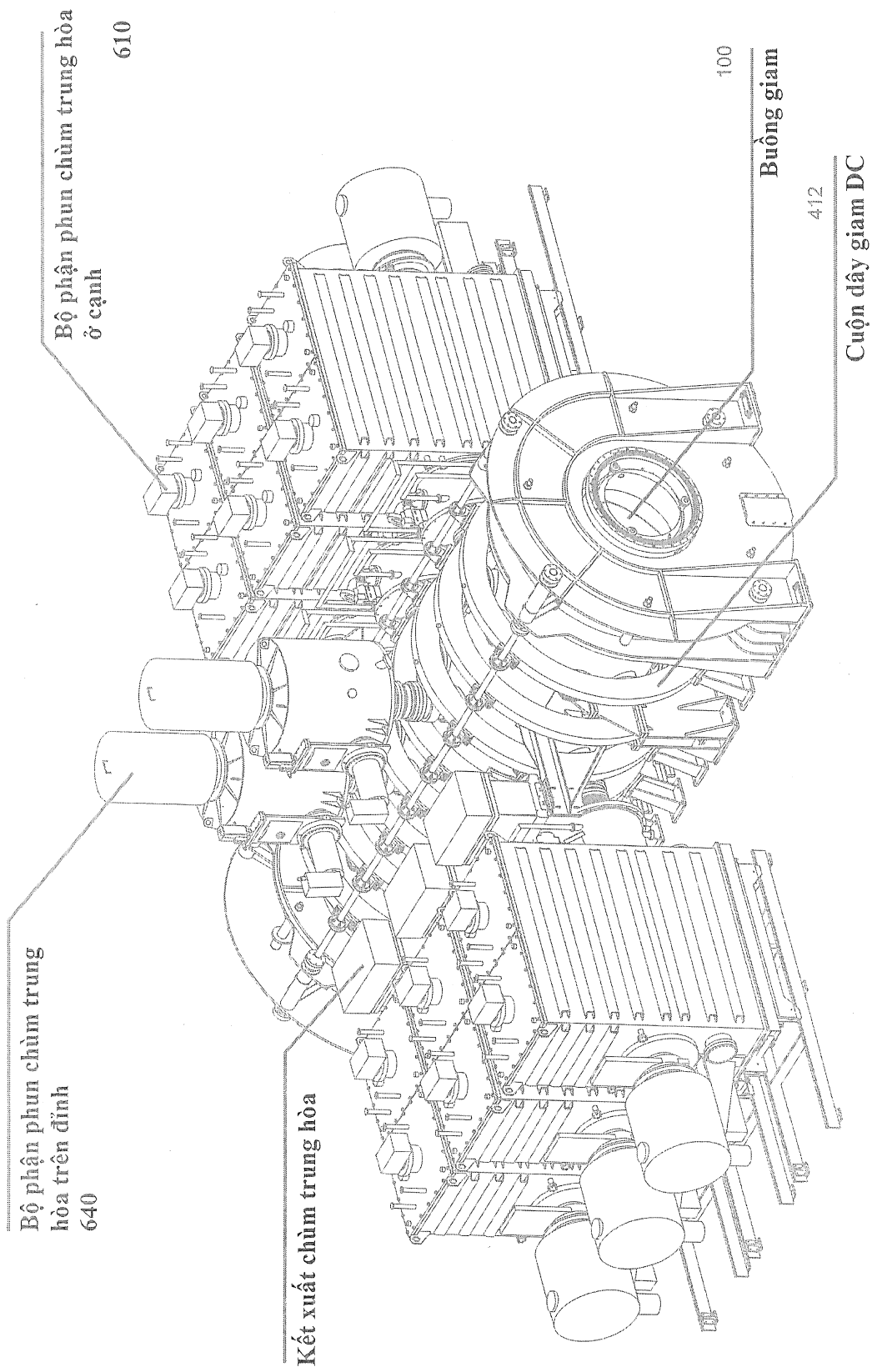


FIG 8

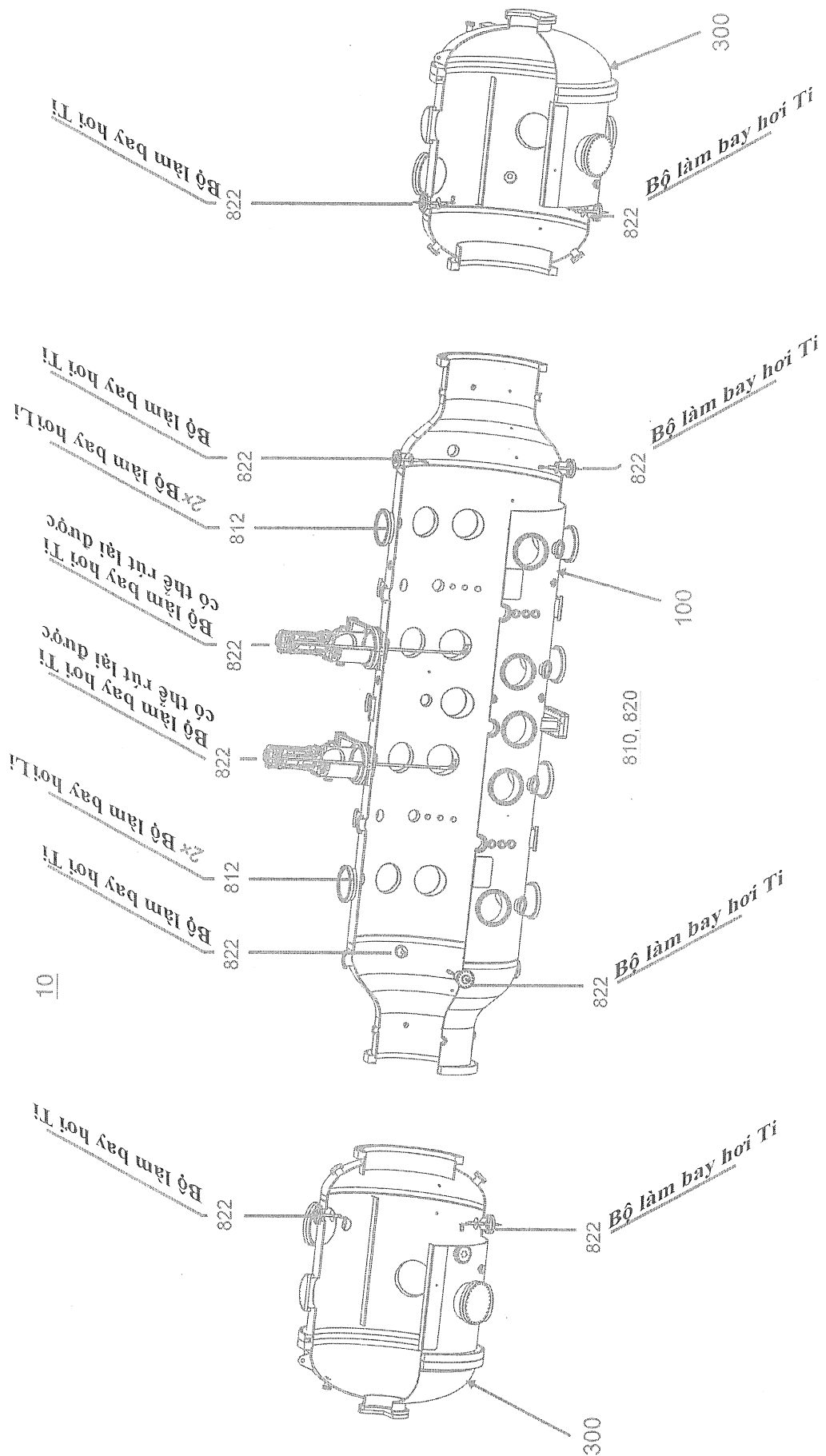
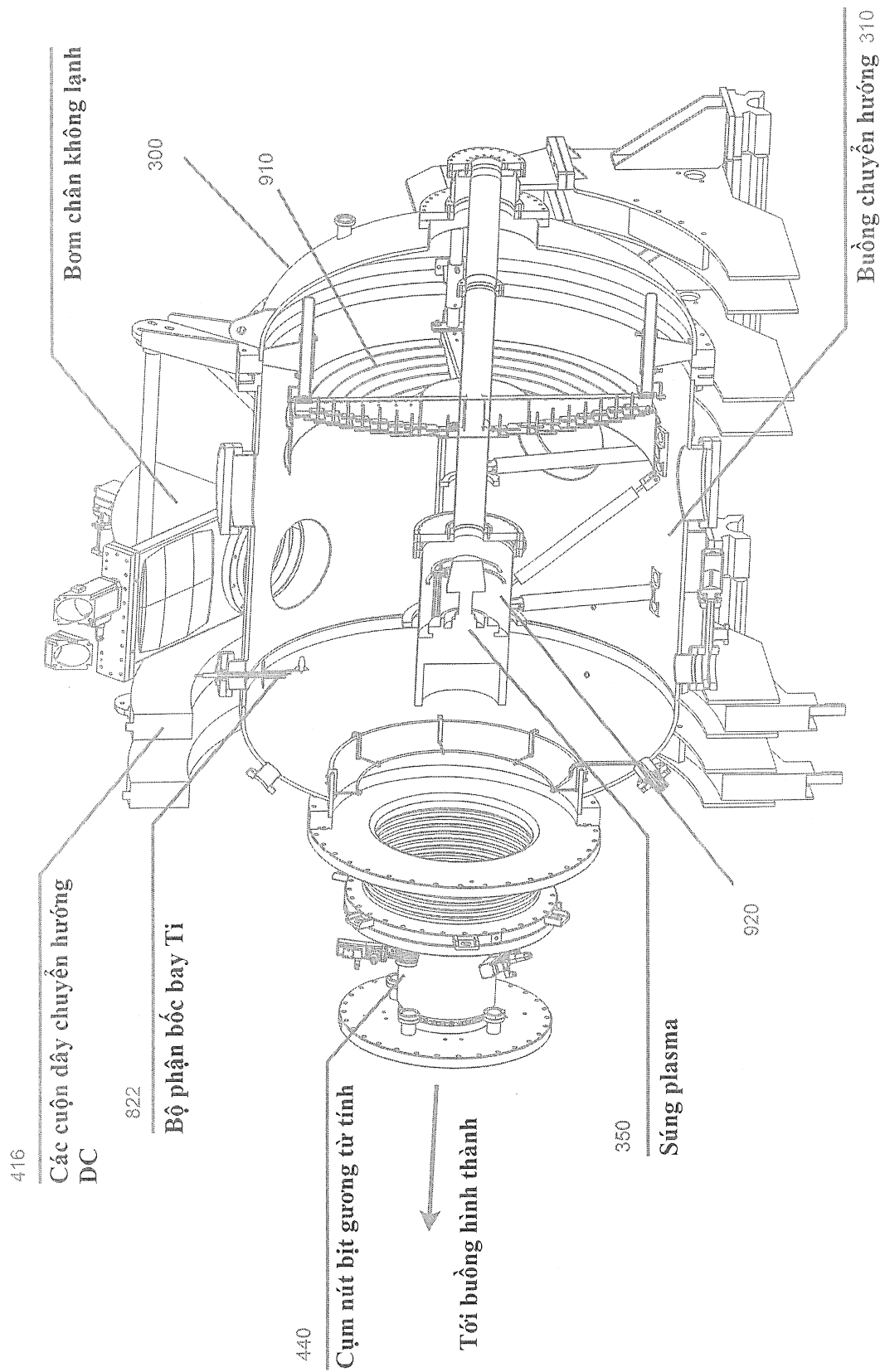


FIG 9



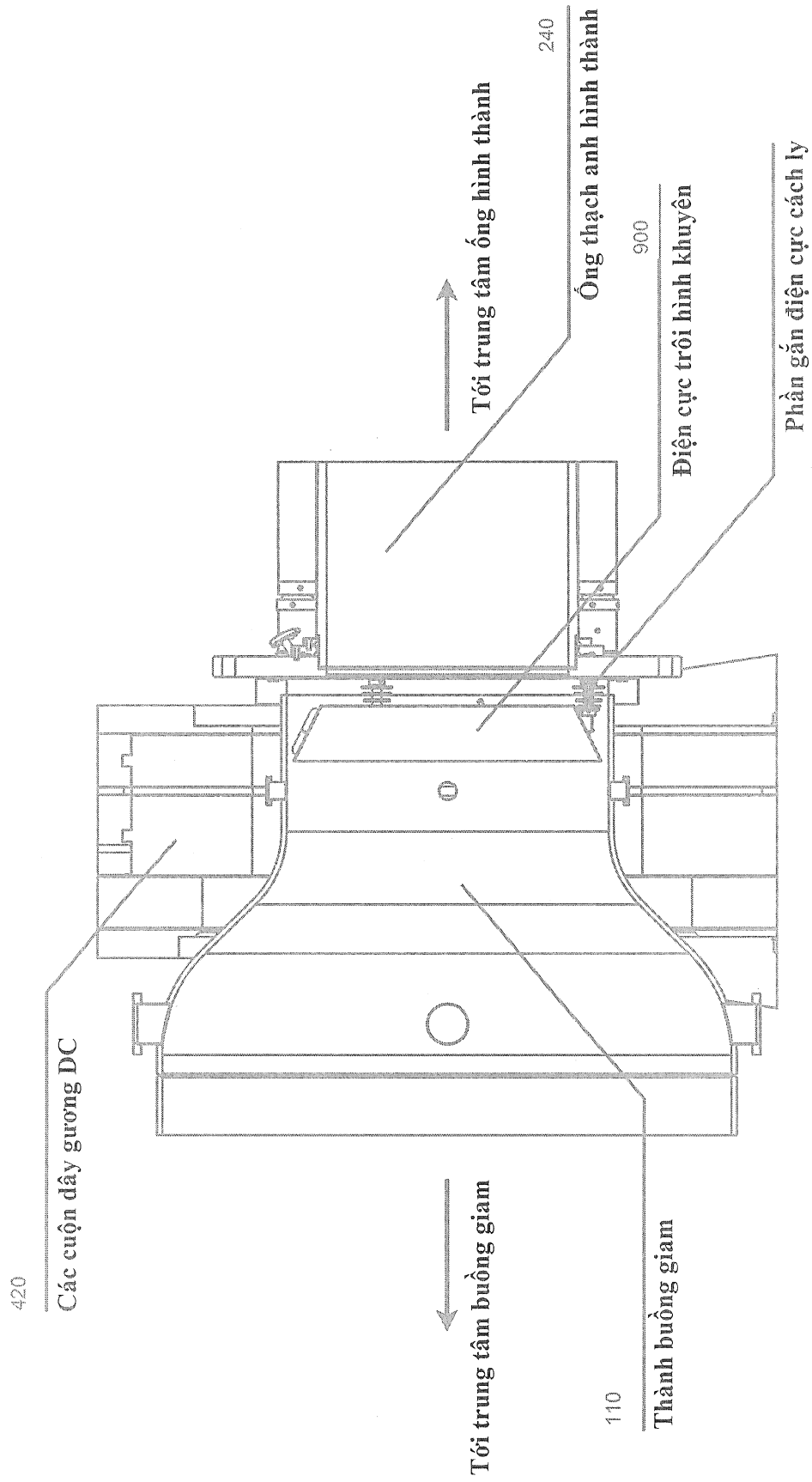


FIG 11

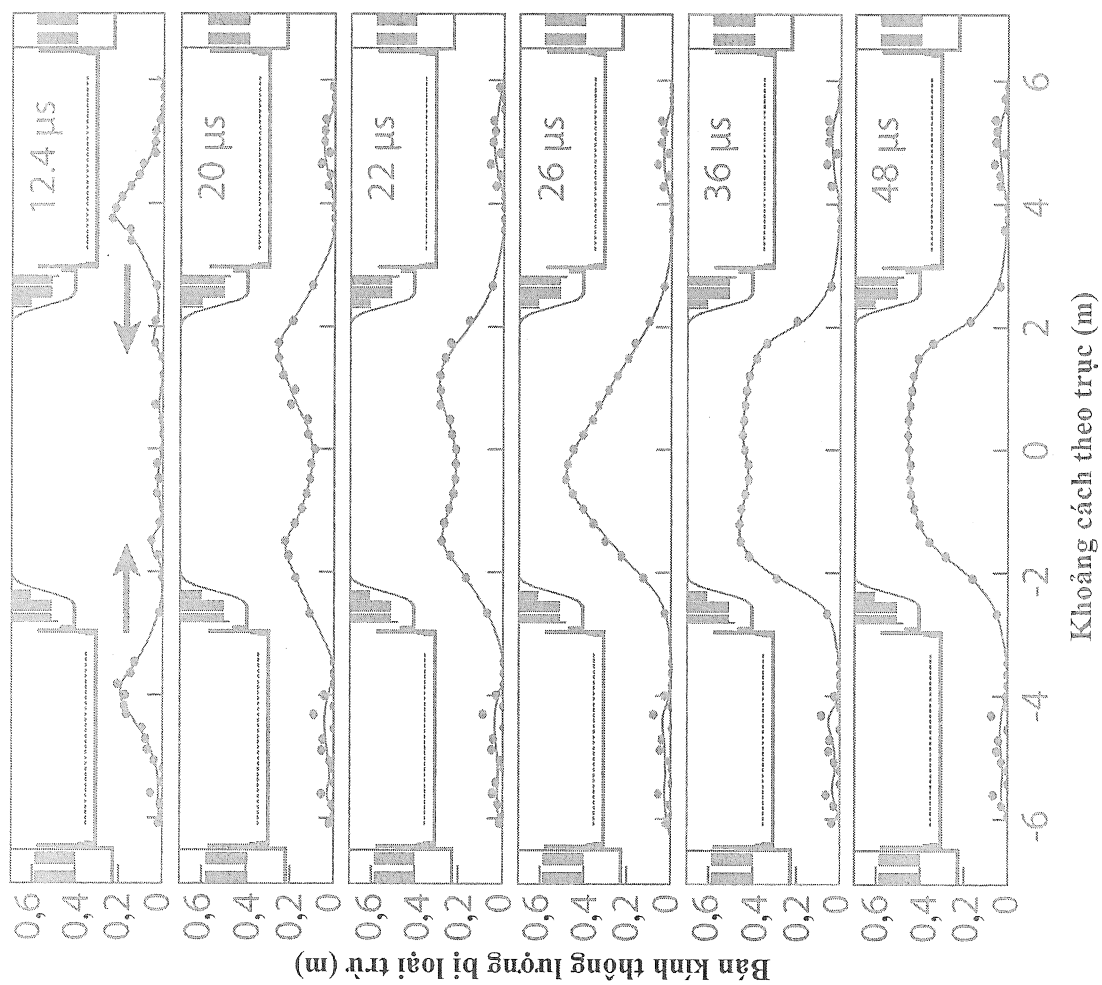


FIG12

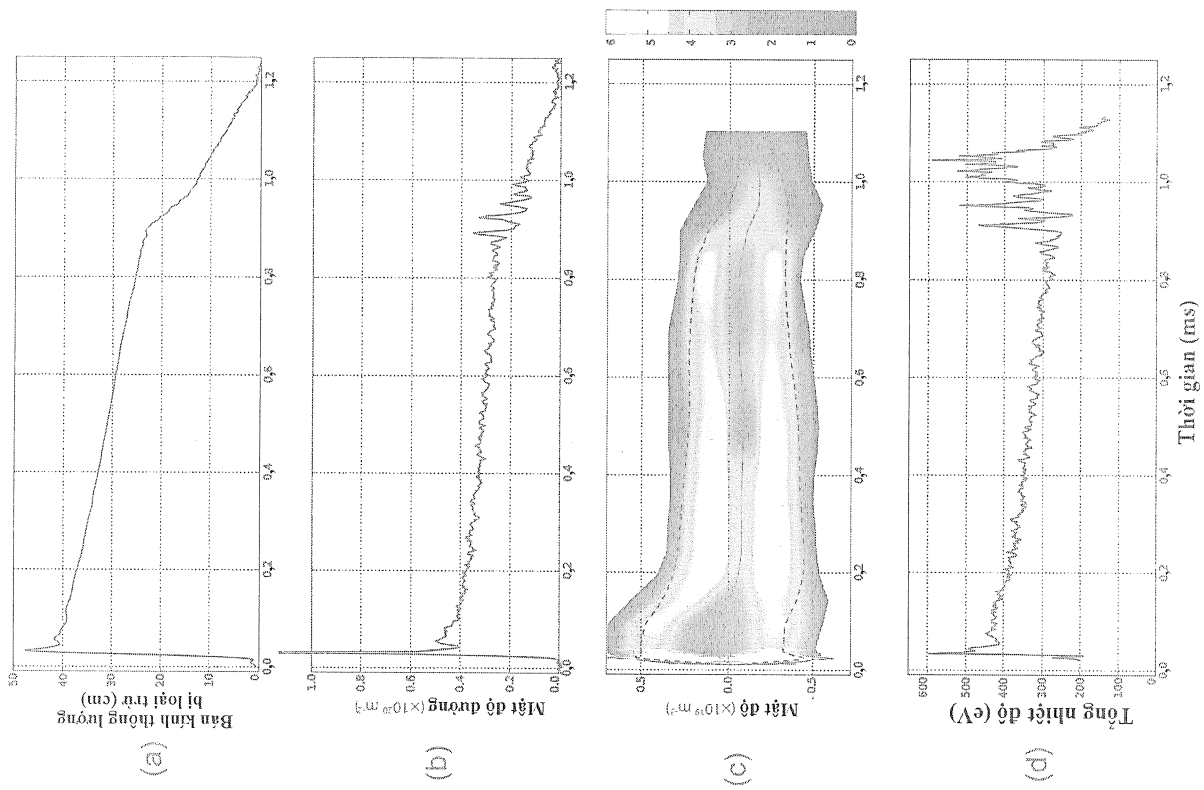


FIG 13

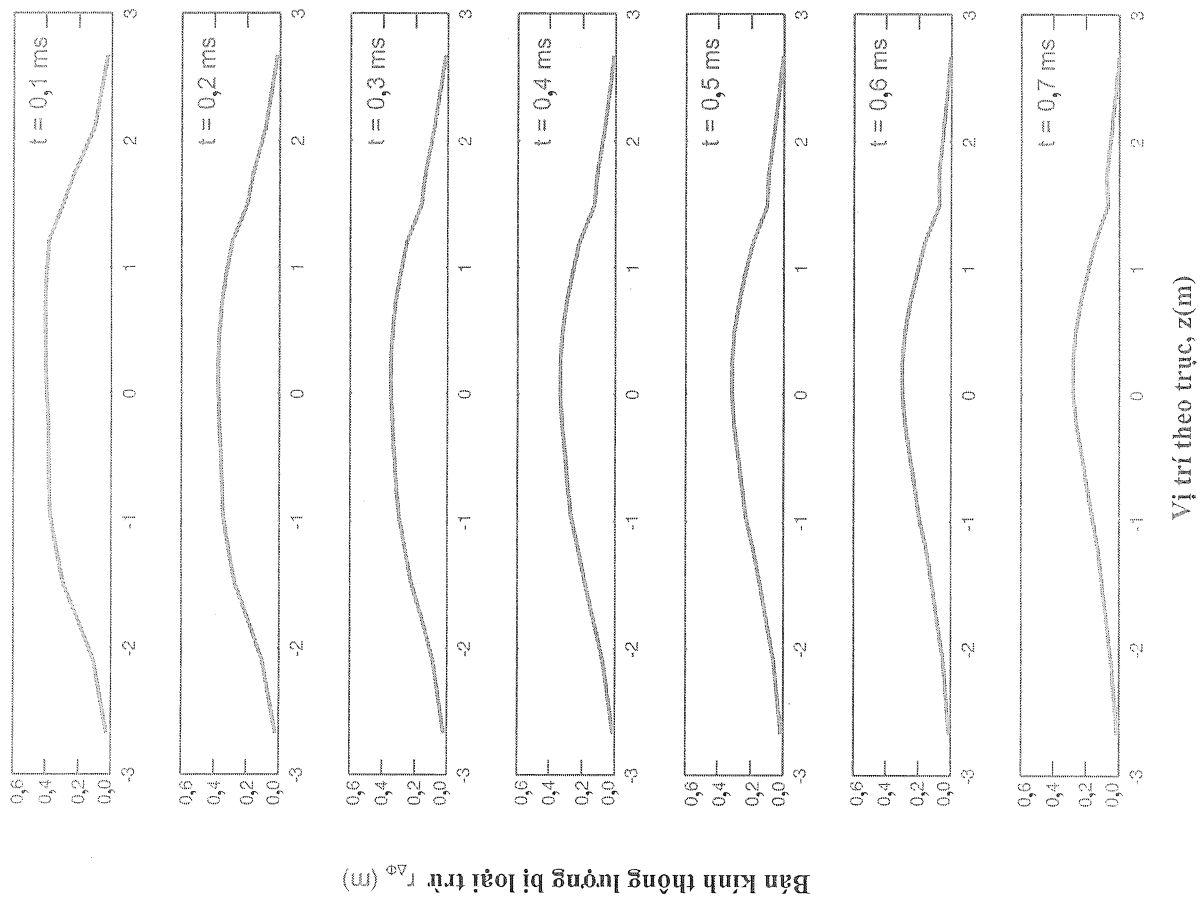


FIG 14

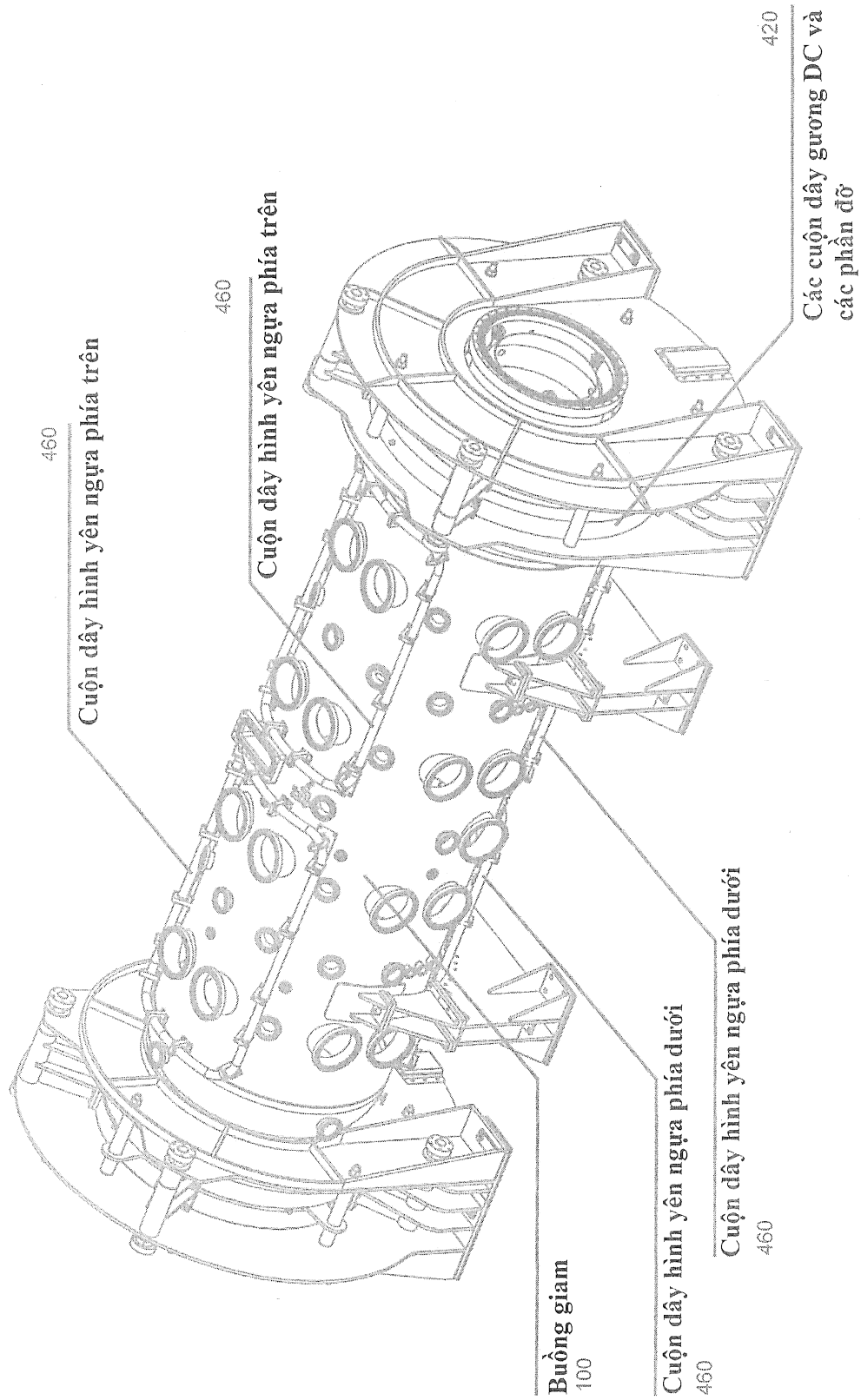


FIG 15

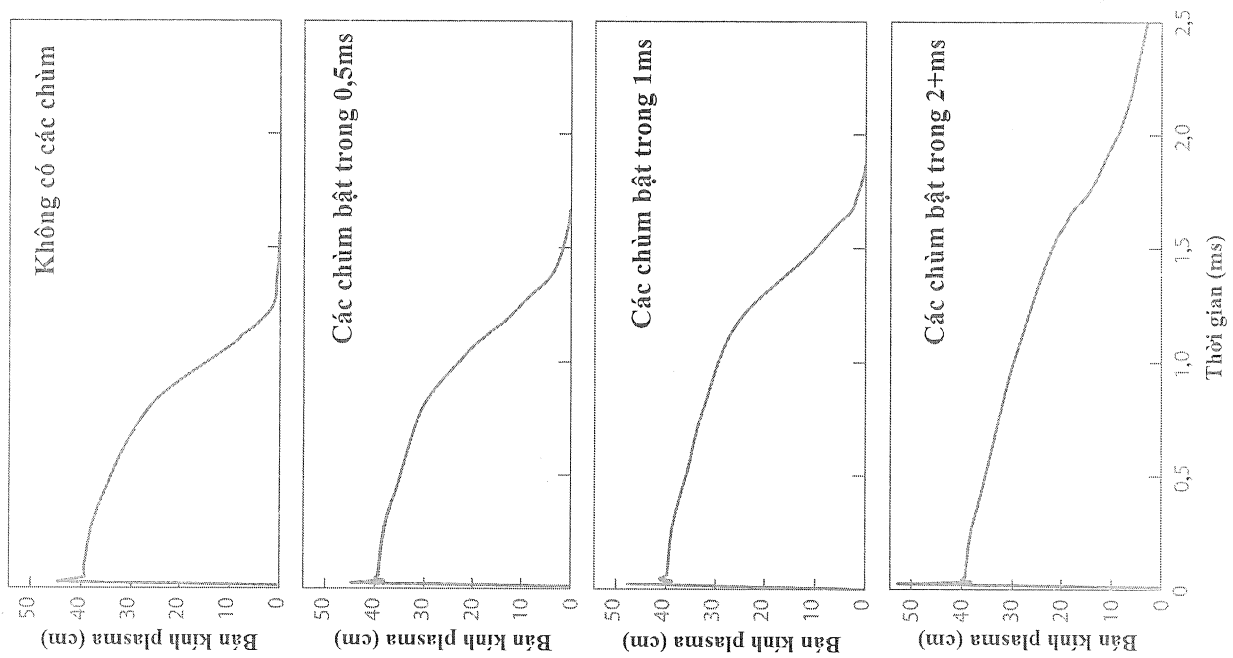


FIG 16

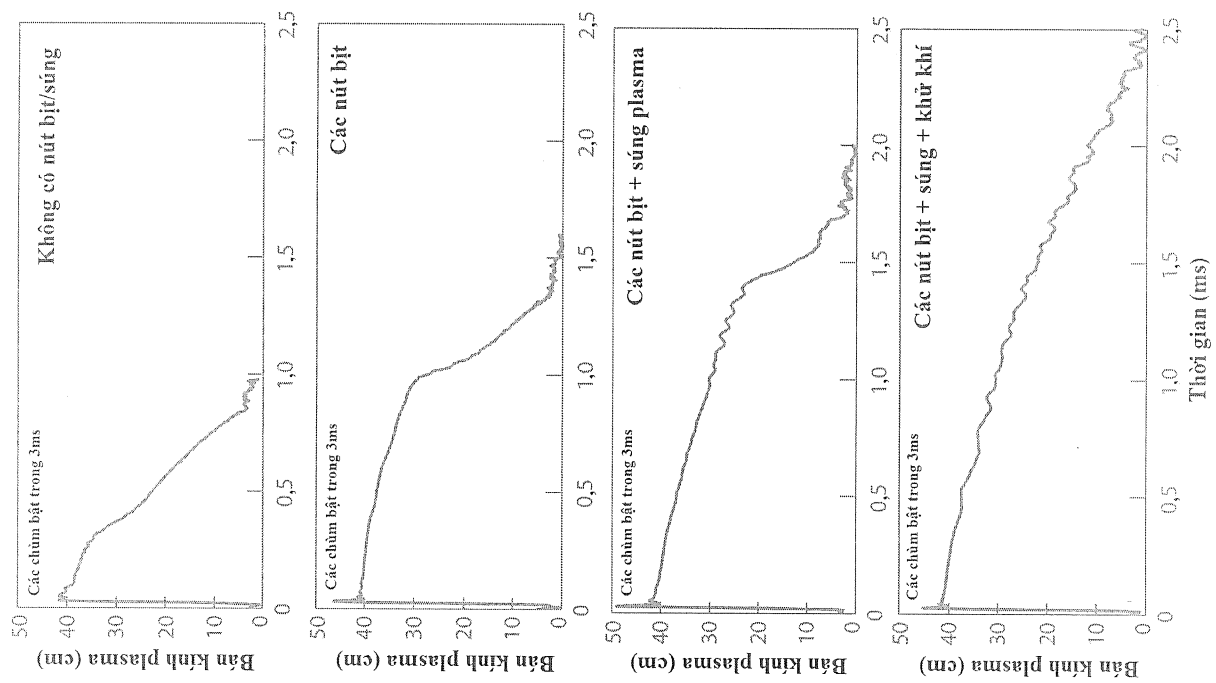


FIG 17

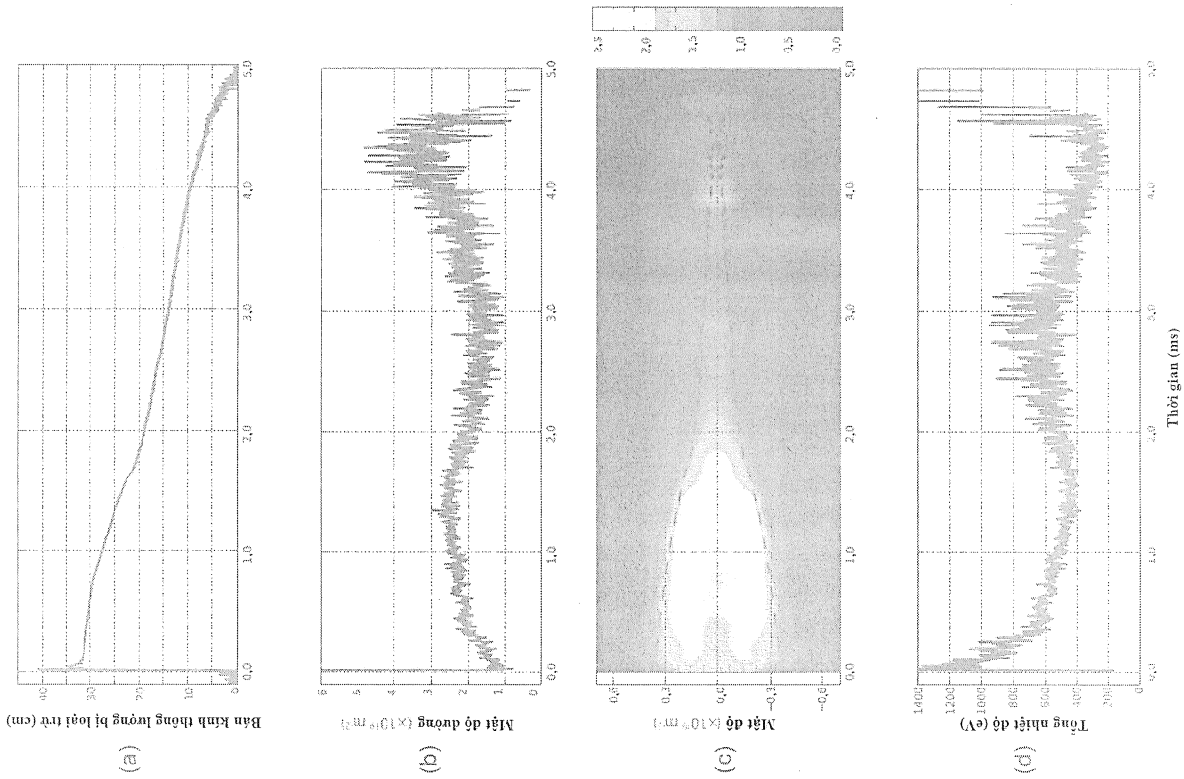


FIG18

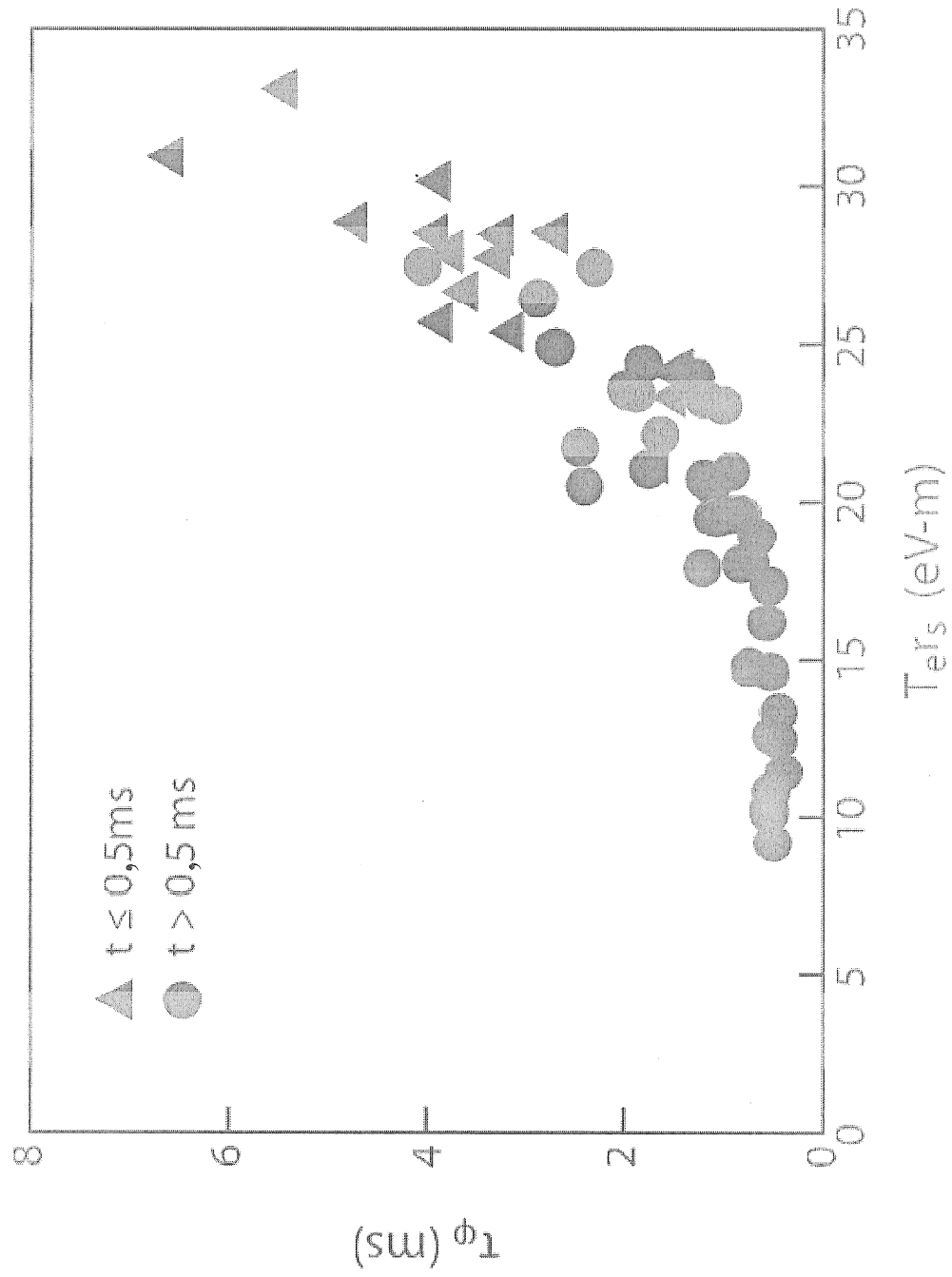


FIG 19

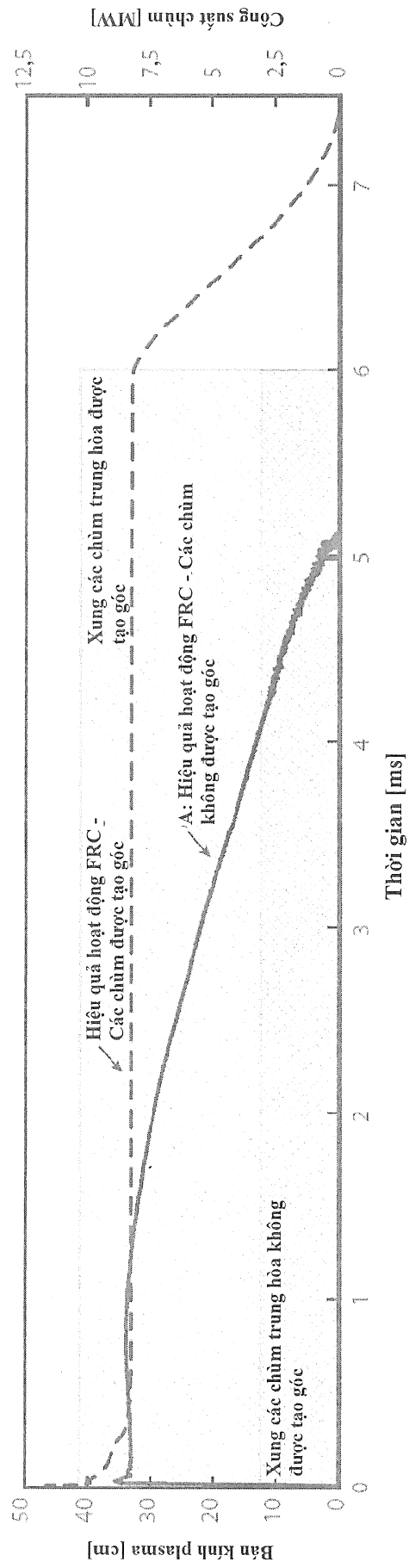
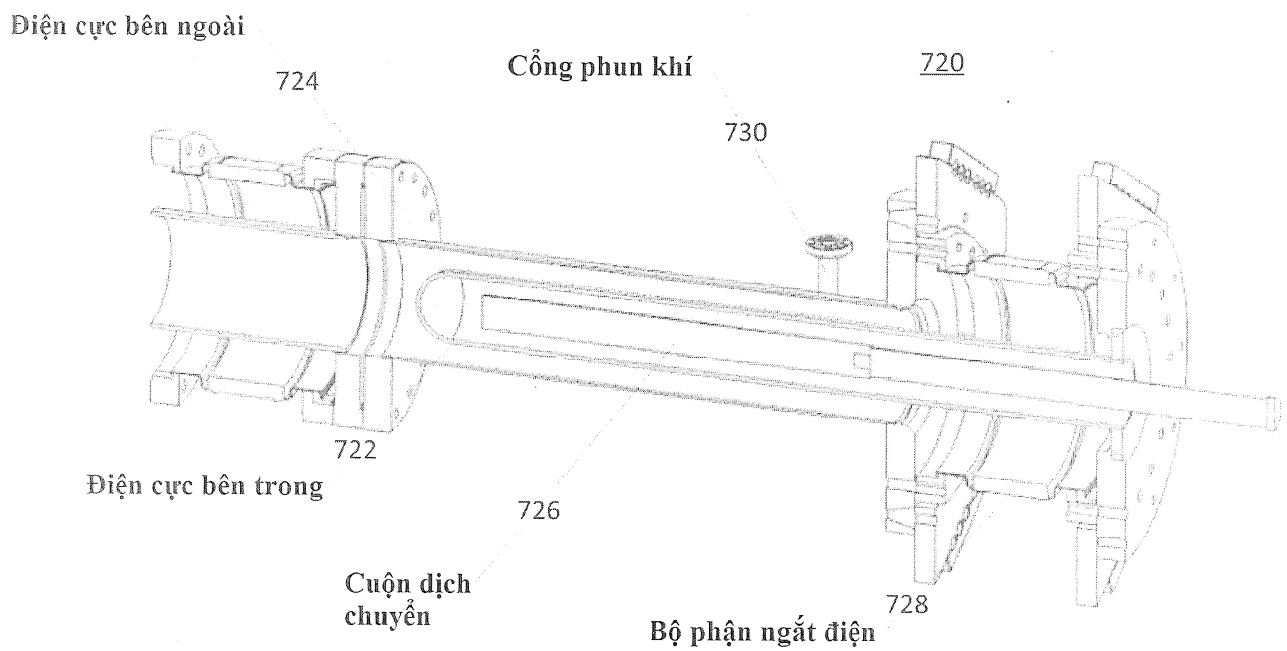
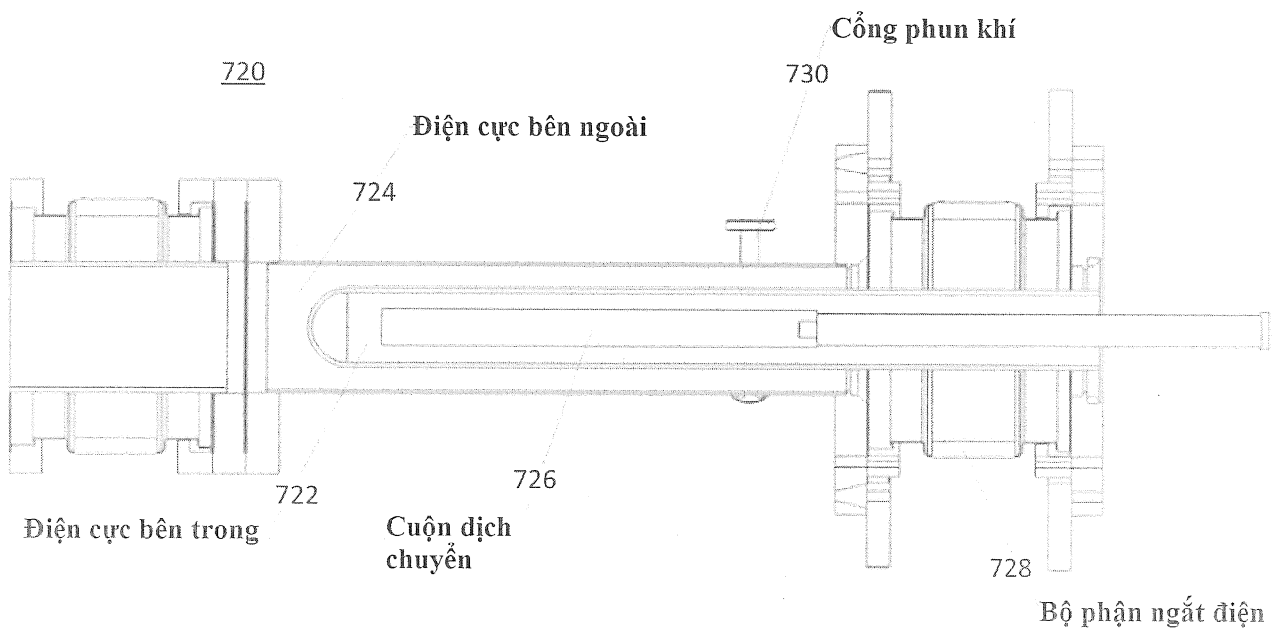


FIG20



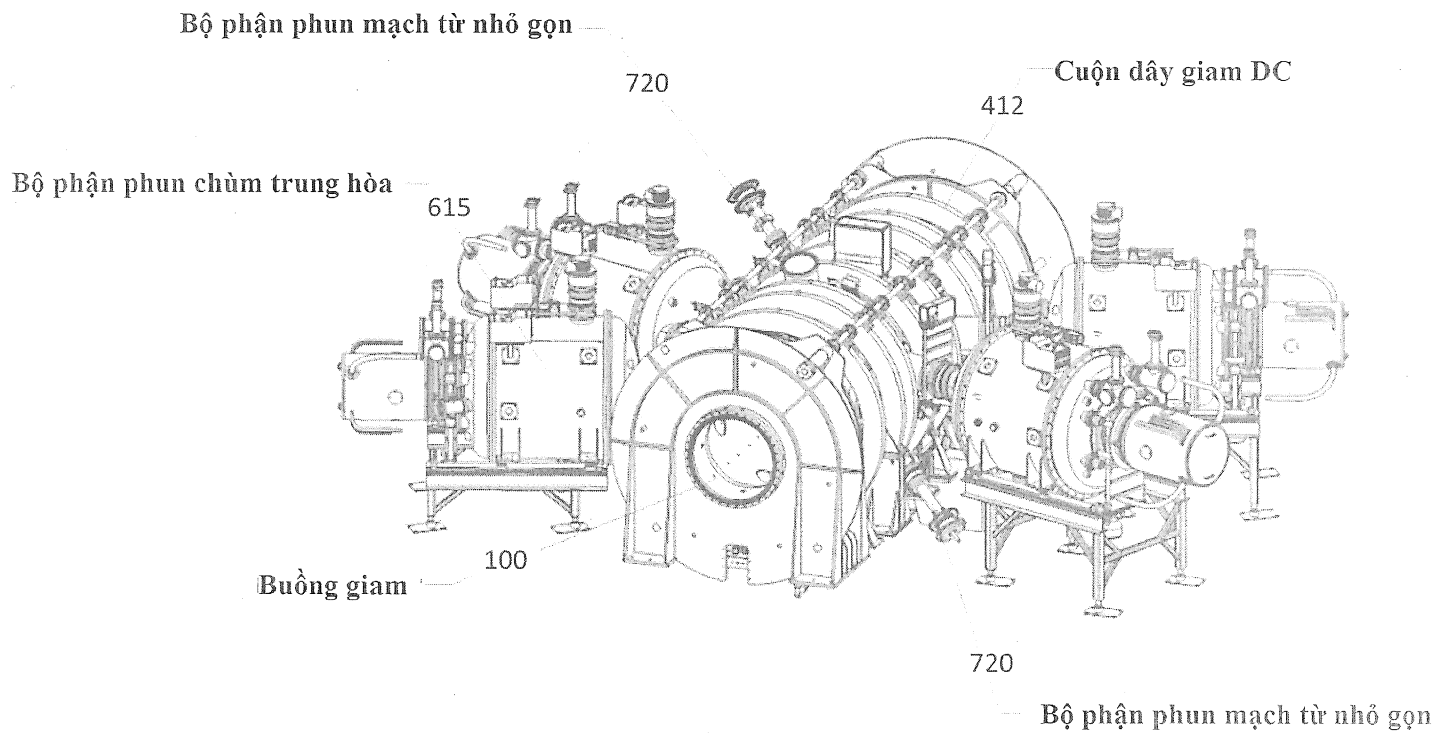


Fig.22A

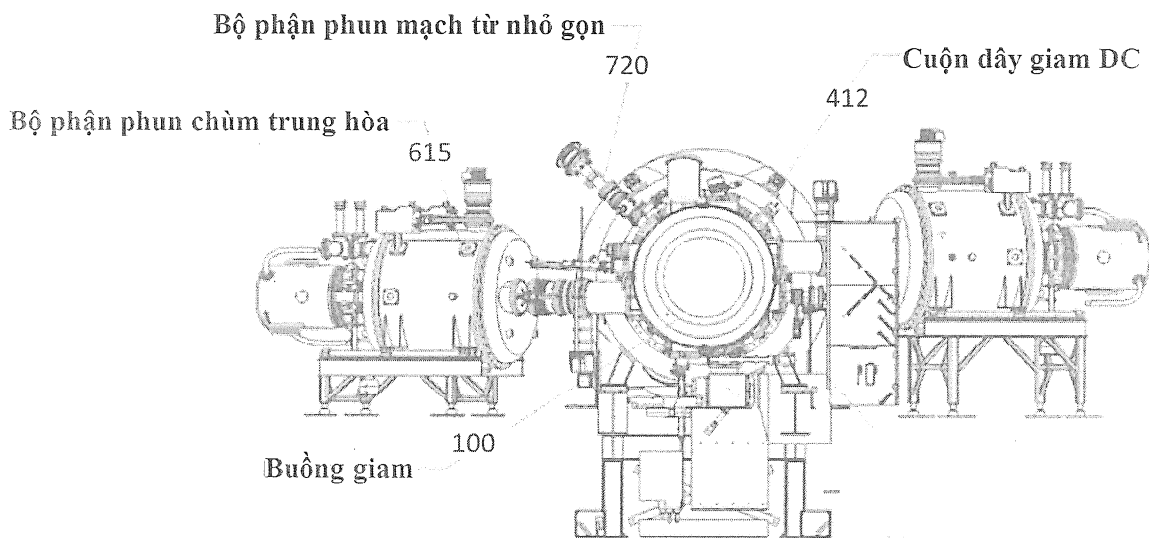


Fig.22B

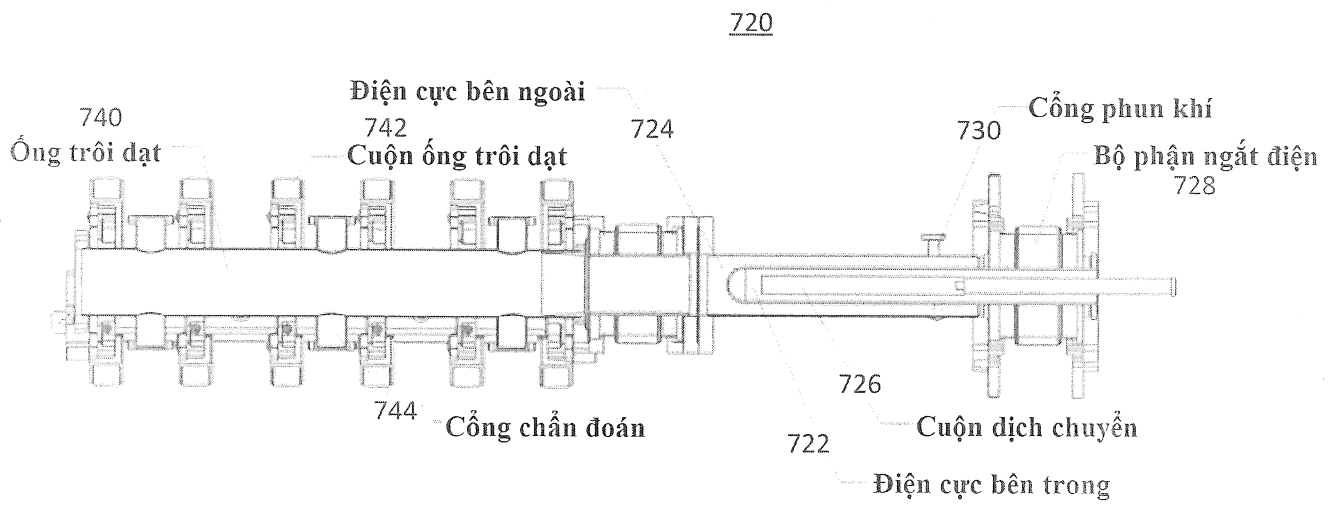


Fig.23A

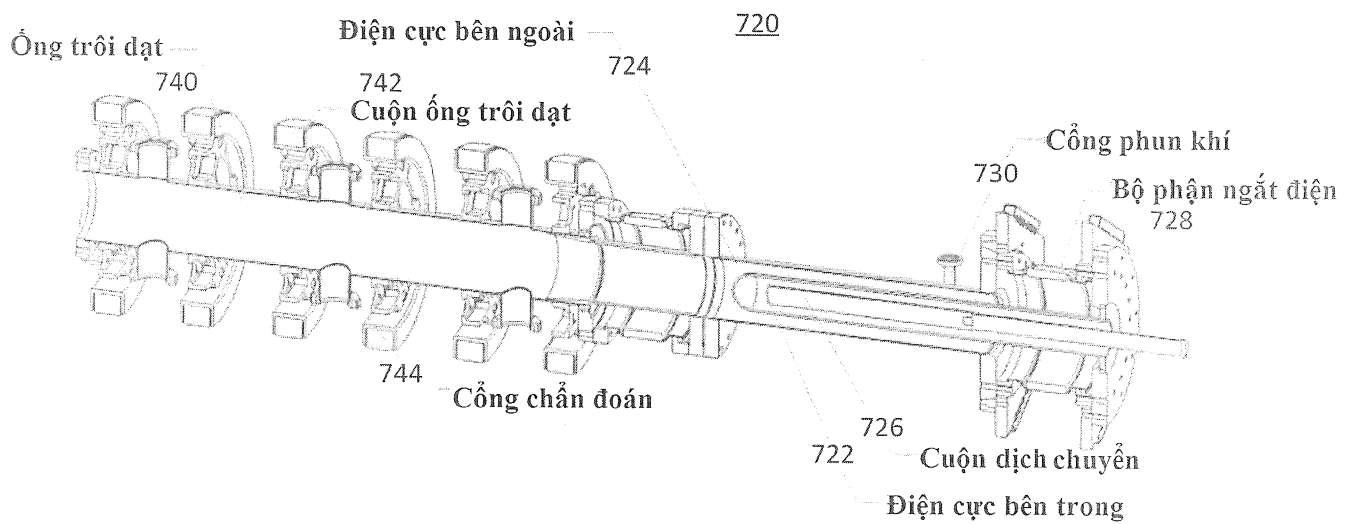


Fig.23B