



(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)



1-0042367

(51)⁸ **G21B 1/05; G21B 1/11; H05H 1/16;**
H05H 1/12; H05H 1/14; G21B 1/00;
G21D 7/00

(13) **B**

(21) 1-2018-02040

(22) 13/11/2016

(86) PCT/US2016/061730 13/11/2016

(87) WO2017/083796 18/05/2017

(30) 62/255,258 13/11/2015 US; 62/309,344 16/03/2016 US

(45) 27/01/2025 442

(43) 27/08/2018 365A

(73) TAE Technologies, Inc. (US)

19631 Pauling, Foothill Ranch, California 92610, UNITED STATES OF AMERICA

(72) GONZALEZ, Jesus Antonio Romero (ES).

(74) Công ty Luật TNHH T&G (TGVN)

(54) HỆ THỐNG VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐỂ ỔN ĐỊNH VỊ TRÍ PLASMA FRC

(21) 1-2018-02040

(57) Sáng chế đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng plasma FRC. Các hệ thống và phương pháp bộc lộ các cân bằng pha sự bất ổn định theo hướng trục của FRC để tạo cường bức sự ổn định theo hướng xuyên tâm, trong khi làm ổn định hoặc điều khiển sự bất ổn định hướng trục. Các hệ thống và phương pháp tạo ra điều khiển hồi tiếp của vị trí hướng trục của plasma FRC độc lập với các đặc tính ổn định của trạng thái cân bằng plasma bằng cách tác động lên các điện áp cấp cho nhóm chứa các cuộn dây bên ngoài đồng tâm với plasma và nhờ sử dụng kỹ thuật điều khiển bất tuyến tính.

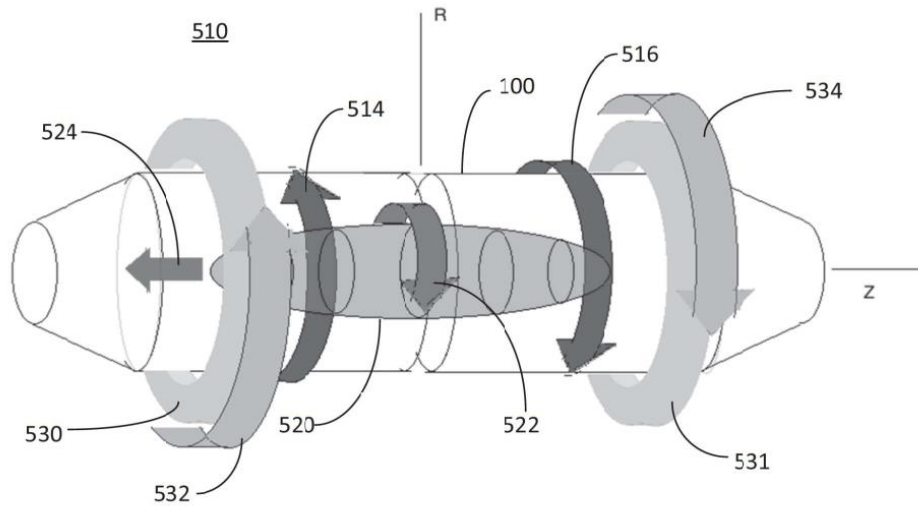


FIG. 24

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Nói chung sáng chế đề cập đến các hệ thống giữ plasma bằng trường từ có cấu hình trường ngược (FRC) và, cụ thể hơn là, đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển của vị trí plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Cấu hình trường ngược (Field Reversed Configuration - FRC) phụ thuộc vào loại các kết cấu liên kết giữ plasma từ tính đã biết như các cuộn dây hình xuyên thu gọn (compact toroid - CT). Nó thể hiện các trường từ 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 đổi 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 trường từ 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 tiên tiến không có neutron tiên tiến như D-He³ và p-B¹¹.

Các thiết bị FRC là các thiết bị chân không cao, kín dựa trên trường từ để nhốt plasmas nhiệt độ cao nhằm mục đích tạo ra năng lượng nhiệt hạch, trong số nhiều mục đích khác. Thành phần của trường từ phải được tạo ra theo mức cần thiết nhờ dòng điện mạnh hình xuyên trong plasma, mà tương tác với trường từ được tạo ra bởi các cuộn dây bên ngoài cho plasma. Trái ngược với các thiết bị nhốt bằng từ khác, các thiết bị FRC không có các cuộn dây bên ngoài để tạo ra trường hình xuyên. Plasma FRC thông thường giống với elipsoit tròn xoay với đường trục của nó dọc theo đường trục của cuộn dây bên ngoài. Biên elipsoit là giới hạn giữ plasma, biên này bao quanh plasma hình xuyên thu gọn với đường trục của nó đồng trục với đường trục elipsoit tròn xoay.

Do không có trường từ hình xuyên, các plasma FRC dễ xảy ra các vết đứt đối xứng trục mà có thể dẫn đến năng lượng, tỷ trọng tăng và thất thoát độ giữ plasma nếu không có các tác động hiệu chỉnh được thực hiện. Độ bất ổn định cơ bản nhất có quan hệ tới thực tế là trong plasma FRC, dòng plasma chạy theo chiều ngược với dòng điện của cuộn dây bên ngoài, hiện tượng này tạo ra mômen xoắn tác động theo hướng căn chỉnh dòng plasma xoắn theo trường bên ngoài (độ mất ổn định nghiêng). Các vết đứt đối xứng trục khác liên quan đến đường trục tròn xoay của plasma chuyển pha theo hướng xuyên tâm (chuyển pha hướng xuyên tâm), biến dạng hình elip của phần thất FRC (chế độ quay), sự kết hợp của chuyển pha hướng xuyên tâm và chế độ quay (chế độ tuần hoàn), vi xoáy plasma, và các chế độ khác. Các vết đứt đối xứng trục này, còn gọi là các bất ổn định plasma, phải được loại bỏ để có độ giữ thích hợp về khối lượng và năng lượng plasma.

Một trong số các giải pháp được đề xuất để đạt được độ ổn định theo hướng xuyên tâm được dựa trên thực tế là các cân bằng pha FRC bao gồm các giải pháp trong đó vị trí plasma hoặc ổn định theo hướng trục nhưng không ổn định theo hướng ngang hoặc hướng xuyên tâm, hoặc ổn định theo hướng xuyên tâm nhưng không ổn định theo hướng trục, nhưng không ổn định/bất ổn định đồng thời theo cả hai hướng. Đối với giải pháp đã biết thứ nhất, sự cân bằng pha nơi mà vị trí plasma ổn định theo phương ngang có đặc tính đối xứng trục mong muốn, nhưng không ổn định theo hướng trục. Tuy nhiên, sự bất ổn định vị trí dọc trục có thể được kiểm soát một cách chủ động nhờ sử dụng một nhóm cuộn dây bên ngoài bố trí đối xứng trục để thu được độ ổn định theo cả hướng trục và hướng xuyên tâm.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Do đó, căn cứ vào tình trạng nêu trên, có mong muốn tạo ra hệ thống và phương pháp để tạo thuận tiện cho việc điều khiển vị trí hướng trục của plasma FRC theo cách độc lập với các đặc tính ổn định theo hướng trục trong sự cân bằng pha của nó. Sự đề xuất này là quan trọng do sự cân bằng pha có thể phải chuyển tiếp giữa sự ổn định theo hướng trục và các cân bằng pha bất ổn định trên các pha khác nhau của sự phóng điện FRC, ví dụ nếu các trường hợp sự bất ổn định theo hướng trục bị mất tạm thời và được phục hồi lại trong quá trình phóng plasma.

Các phương án thực hiện được mô tả ở đây là đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC một cách độc lập với các đặc tính ổn định theo hướng trục của sự cân bằng pha của plasma FRC. Đối với mục đích thứ nhất, sự cân bằng pha nơi mà vị trí plasma ổn định theo phương ngang hoặc hướng xuyên tâm có đặc tính đối xứng trục mong muốn, nhưng không ổn định theo hướng trục. Tuy nhiên, sự bất ổn định vị trí dọc trục được kiểm soát một cách chủ động nhờ sử dụng một nhóm cuộn dây bên ngoài bố trí đối xứng trục để điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC.

Các phương án thực hiện sáng chế thực hiện các cân bằng pha sự bất ổn định theo hướng trục của FRC để tạo cường bức sự ổn định theo hướng xuyên tâm, trong khi làm ổn định hoặc điều khiển sự bất ổn định hướng trục. Bằng cách này, sự ổn định theo cả hướng trục và hướng xuyên tâm có thể đạt được. Phương pháp luận về điều khiển được thực hiện để thay đổi trường từ bên ngoài hoặc trường từ cân bằng để tạo ra sự ổn định theo hướng trục hoặc hướng ngang cho plasma FRC nhưng không ổn định theo hướng trục, và sau đó tác động lên dòng điện của cuộn dây tạo trường xuyên tâm để phục hồi tức thời vị trí plasma FRC về phía mặt phẳng giữa trong khi làm giảm tới mức tối thiểu sự quá tải và/hoặc các dao động xung quanh mặt phẳng giữa của buồng giam giữ. Ưu điểm của giải pháp này là làm giảm độ phức tạp của các bộ kích hoạt mà cần thiết cho việc điều khiển. So với các giải pháp đã biết với nhiều bậc tự do, phương pháp luận của phương án thực hiện được mô tả ở đây là làm giảm độ phức tạp trong vấn đề điều khiển theo trục tròn xoay của plasma FRC có một bậc tự do.

Các hệ thống và phương pháp được mô tả ở đây có các đặc điểm với ưu điểm sau: điều khiển hồi tiếp của vị trí hướng trục của plasma FRC bằng cách tác động lên các điện áp cấp cho nhóm chứa các cuộn dây bên ngoài đồng tâm với plasma; điều khiển hồi tiếp của vị trí hướng trục của FRC nhờ sử dụng kỹ thuật điều khiển bất tuyến tính; và điều khiển hồi tiếp của vị trí hướng trục của FRC một cách độc lập với điều khiển sự ổn định các đặc tính của trạng thái cân bằng plasma. Sự điều khiển độc lập này là ưu điểm do sự cân bằng pha có thể phải chuyển tiếp giữa sự ổn định theo hướng trục và các cân bằng pha bất ổn định trên các pha khác nhau của sự phóng điện FRC,

ví dụ nếu trường hợp sự bất ổn định hướng trục bị mất tạm thời và được phục hồi trong quá trình phóng plasma.

Các hệ thống, phương pháp, dấu hiệu và ưu điểm của các phương án thực hiện làm ví dụ sẽ rõ ràng hoặc sẽ trở nên rõ ràng đối với người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật khi thẩm định các hình vẽ kèm theo và phần mô tả chi tiết. Tất cả các phương pháp, dấu hiệu và ưu điểm bổ sung này được đưa vào trong bản mô tả này, và được bảo vệ bởi các điểm yêu cầu bảo hộ kèm theo là điều đã được dự tính. Cũng đã dự tính rằng các điểm yêu cầu bảo hộ không bị giới hạn ở sự cần thiết các chi tiết của các phương án thực hiện làm ví dụ.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Các hình vẽ kèm theo, mà được đưa vào thành một phần của bản mô tả này, thể hiện các phương án thực hiện làm ví dụ, và cùng với phần mô tả chung bên trên và phần mô tả chi tiết của các phương án thực hiện làm ví dụ dưới đây, chỉ có tác dụng giải thích và bộc lộ các nguyên lý của sáng chế.

Fig.1 là hình vẽ thể hiện sự giam giữ hạt trong hệ thống FRC theo sáng chế trong chế độ FRC hiệu suất cao (HPF) ngược lại với trong chế độ FRC đã biết (CR), và ngược lại với các thí nghiệm FRC đã biết khác.

Fig.2 là hình vẽ thể hiện các bộ phận của hệ thống FRC theo sáng chế và dạng thù hình trường từ của FRC có thể tạo ra trong hệ thống FRC theo sáng chế.

Fig.3A là hình vẽ thể hiện kết cấu bố trí cơ bản của hệ thống FRC theo sáng chế khi được nhìn từ phía trên, bao gồm sự bố trí ưu tiên của các chùm trung hòa, điện cực, các súng plasma, các chốt cấm gương và bộ phận phun hạt;

Fig.3B là hình vẽ thể hiện bề giữ trung tâm khi được nhìn từ phía trên và thể hiện các chùm trung hòa mà được bố trí ở góc vuông góc với đường trục chính đối xứng trong bề giữ trung tâm;

Fig.3C là hình vẽ thể hiện bề giữ trung tâm khi được nhìn từ phía trên và thể hiện các chùm trung hòa mà được bố trí theo góc nhọn so với đường trục chính đối xứng trong bề giữ trung tâm và được dẫn hướng để phun các hạt về phía mặt phẳng giữa của bề giữ trung tâm;

Fig.4 là hình vẽ dạng sơ đồ thể hiện các bộ phận của hệ thống nguồn xung dùng cho các vùng hình thành;

Fig.5 là hình chiếu đẳng góc thể hiện sóng trượt hình thành nguồn xung riêng biệt;

Fig.6 là hình chiếu đẳng góc thể hiện cụm ống hình thành;

Fig.7 là hình chiếu đẳng góc cắt một phần thể hiện hệ thống chùm trung hòa và các bộ phận chính;

Fig.8 là hình chiếu đẳng góc thể hiện cụm kết cấu chùm trung hòa trên buồng giam giữ.

Fig.9 là hình chiếu đẳng góc cắt một phần thể hiện cụm kết cấu ưu tiên của các hệ thống khử khí Ti và Li;

Fig.10 là hình chiếu đẳng góc cắt một phần thể hiện súng plasma được lắp trong buồng đôi hướng. Cũng được thể hiện là chốt cắm gương từ kết hợp và cụm điện cực đôi hướng;

Fig.11 là hình vẽ thể hiện kết cấu bố trí ưu tiên của điện cực chênh hình khuyên ở đầu hướng trục của buồng giam giữ;

Fig.12 là hình vẽ thể hiện sự phát triển của bán kính thông lượng loại trừ trong hệ thống FRC thu được từ một loạt các vòng lặp nghịch từ bên ngoài ở hai các vùng hình thành ép theta đảo trường và các đầu dò từ gắn chìm bên trong buồng giam giữ kim loại trung tâm. Thời gian được đo từ cơ cấu đảo trường đã được đồng bộ tức thời trong các nguồn hình thành, và khoảng cách z được đưa ra tương đối với mặt phẳng giữa hướng trục của máy.

Các hình vẽ từ Fig.13 (a) đến Fig.13(d) thể hiện dữ liệu từ không HPF tiêu biểu, nạp không được duy trì trên hệ thống FRC theo sáng chế. Được thể hiện dưới dạng các hàm thời gian là (a) bán kính thông lượng loại trừ ở mặt phẳng giữa, (b) 6 dây trong mật độ tích hợp dạng dây chuyển từ mặt phẳng giữa của dụng cụ đo giao thoa CO₂, (c) các biên dạng theo hướng xuyên tâm có mật độ đảo Abel từ Dữ liệu của dụng cụ đo giao thoa CO₂, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ sự cân bằng nhiệt.

Fig.14 thể hiện các biên dạng hướng trục có thông lượng được loại trừ ở các thời điểm đã được chọn cho cùng hoạt động phóng của hệ thống FRC theo sáng chế được thể hiện trên Fig.13;

Fig.15 là hình chiếu đẳng góc thể hiện các cuộn đặt hai bên lắp bên ngoài buồng giam giữ;

Fig.16 thể hiện các tương quan của tuổi thọ FRC và chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun. Như được thể hiện, các xung dài hơn của chùm tạo ra các FRC sống lâu hơn;

Fig.17 thể hiện các hiệu ứng riêng biệt và kết hợp của các bộ phận khác nhau của hệ thống FRC đối với hiệu quả FRC và khả năng duy trì của chế độ HPF;

Các hình vẽ từ Fig.18(a) đến Fig.18(d) thể hiện dữ liệu từ HPF minh họa, quá trình nạp không được duy trì trên hệ thống FRC theo sáng chế. Được thể hiện dưới dạng các hàm thời gian gồm (a) bán kính thông lượng loại trừ ở mặt phẳng giữa, (b) 6 cung của mật độ tích hợp dạng dây chuyền từ mặt phẳng giữa dụng cụ đo giao thoa CO₂, (c) Các biên dạng theo hướng xuyên tâm có mật độ đảo Abel từ dữ liệu của dụng cụ đo giao thoa CO₂, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ sự cân bằng nhiệt.

Fig.19 thể hiện độ giữ thông lượng dưới dạng hàm của nhiệt độ electron (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 thể hiện tuổi thọ của FRC tương ứng với chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun không có góc và có góc.

Fig.21A và Fig.21B thể hiện kết cấu bố trí cơ bản của bộ phun CT (CT: compact toroid: cuộn dây hình xuyên thu gọn).

Fig.22A và Fig.22B thể hiện bề giữ trung tâm thể hiện bộ phun CT gắn vào đó.

Fig.23A và Fig.23B thể hiện kết cấu bố trí cơ bản của phương án thực hiện khác của bộ phun CT có ống làm lệch lắp vào đó.

Fig.24 là hình vẽ dạng sơ đồ thể hiện cơ cấu điều khiển vị trí hướng trục của plasma FRC bên trong bề giữ (CV: confining vessel);

Fig.25 là lưu đồ thể hiện kế hoạch điều khiển chế độ trượt rộng;

Fig.26 là hình vẽ thể hiện biểu đồ tổng hợp của các ví dụ về mô phỏng điều khiển vị trí hướng trục chế độ trượt;

Fig.27 là hình vẽ thể hiện biểu đồ tổng hợp của các ví dụ về mô phỏng điều khiển vị trí hướng trục chế độ trượt.

Cần lưu ý rằng các hình vẽ không cần được vẽ theo đúng tỷ lệ và các thành phần của các kết cấu hoặc chức năng tương tự thường được biểu thị bởi các số chỉ dẫn giống nhau nhằm mục đích minh họa qua các hình vẽ. Cũng cần lưu ý rằng các hình vẽ chỉ nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho việc mô tả các phương án thực hiện khác nhau mà đã được mô tả ở đây. Các hình vẽ không cần mô tả mỗi khía cạnh của các phương án được bộc lộ ở đây và không làm giới hạn phạm vi của các điểm yêu cầu bảo hộ.

Mô tả chi tiết sáng chế

Các phương án thực hiện sáng chế được tạo ra ở đây đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC một cách độc lập với các đặc tính ổn định theo hướng trục của sự cân bằng của plasma FRC. Các ví dụ minh họa về các phương án thực hiện mà đã được mô tả ở đây, các ví dụ này sử dụng nhiều dấu hiệu trong số các dấu hiệu và phương án bổ sung này theo cả hai cách riêng biệt và kết hợp, sau đây sẽ được mô tả chi tiết hơn có dựa vào các hình vẽ kèm theo. Phần mô tả chi tiết này chỉ nhằm bộc lộ cho người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật các chi tiết hơn để thực hiện các phương án ưu tiên của sáng chế và không nhằm làm giới hạn phạm vi của sáng chế. Do đó, các kết hợp của các dấu hiệu và các bước được bộc lộ trong phần mô tả chi tiết sau đây có thể không cần thiết để thực hiện sáng chế theo nghĩa rộng nhất, và thay vào đó được bộc lộ chỉ để mô tả một cách cụ thể các ví dụ minh họa của sáng chế.

Ngoài ra, các dấu hiệu khác nhau của các ví dụ minh họa và các điểm yêu cầu bảo hộ phụ thuộc có thể được kết hợp theo cách mà chúng không được liệt kê một cách cụ thể và rõ ràng để tạo ra các phương án bổ sung có lợi của sáng chế. Ngoài ra,

cần lưu ý một cách tuyệt đối rằng tất cả các dấu hiệu được bộc lộ trong phần mô tả và/hoặc các điểm yêu cầu bảo hộ được dự định sẽ được bộc lộ theo cách riêng biệt và độc lập với nhau nhằm mục đích bộc lộ ban đầu, cũng như nhằm mục đích hạn chế đối tượng yêu cầu bảo hộ độc lập về các thành phần của các dấu hiệu theo các phương án thực hiện và/hoặc các điểm yêu cầu bảo hộ. Cũng cần lưu ý một cách tuyệt đối rằng tất cả các khoảng trị số hoặc các chỉ báo của các nhóm của các đối tượng bộc lộ mỗi trị số nằm trong khoảng có thể có hoặc đối tượng trung gian nhằm mục đích bộc lộ ban đầu, cũng như nhằm mục đích hạn chế đối tượng yêu cầu bảo hộ.

Các giải pháp đã biết về cơ bản để tạo ra sự ổn định cho các bất ổn định FRC theo hướng trục nhưng không ổn định theo hướng xuyên tâm, hoặc ổn định theo hướng xuyên tâm nhưng không ổn định theo hướng trục, nhưng không ổn định theo cả hai hướng ở cùng thời điểm. Đối với kiểu thứ nhất, sự cân bằng pha nơi mà vị trí plasma ổn định theo phương ngang hoặc hướng xuyên tâm có đặc tính đối xứng trục mong muốn, nhưng không ổn định theo hướng trục. Xem xét phần mô tả phía trên, các phương án thực hiện được tạo ra ở đây đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC một cách độc lập với các đặc tính ổn định theo hướng trục của sự cân bằng của plasma FRC. Sự bất ổn định vị trí dọc trục, tuy nhiên, được kiểm soát một cách chủ động nhờ sử dụng một nhóm cuộn dây bên ngoài bố trí đối xứng trục để điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC. Các hệ thống và phương pháp tạo ra điều khiển hồi tiếp của vị trí hướng trục của plasma FRC độc lập với sự ổn định các đặc tính của trạng thái cân bằng plasma bằng cách tác động lên các điện áp cấp cho nhóm chứa các cuộn dây bên ngoài đồng tâm với plasma và nhờ sử dụng kỹ thuật điều khiển bất tuyến tính.

Các phương án thực hiện được thể hiện ở đây mô tả các cân bằng pha sự bất ổn định theo hướng trục của FRC để tạo cường bức sự ổn định theo hướng xuyên tâm, trong khi làm ổn định hoặc điều khiển sự bất ổn định hướng trục. Bằng cách này, sự ổn định theo cả hai hướng trục và hướng xuyên tâm có thể đạt được. Phương pháp luận về điều khiển được tạo ra để thay đổi trường từ bên ngoài hoặc trường từ cân

bằng để tạo ra sự ổn định theo hướng trục hoặc hướng ngang cho plasma FRC nhưng không ổn định theo hướng trục, và sau đó tác động lên dòng điện của cuộn dây tạo trường xuyên tâm để phục hồi tức thời vị trí plasma FRC về phía mặt phẳng giữa trong khi làm giảm tới mức nhỏ nhất mức cường điệu và/hoặc các dao động xung quanh mặt phẳng giữa của buồng giam giữ. Ưu điểm của giải pháp này là làm giảm độ phức tạp của các bộ kích hoạt mà cần thiết cho việc điều khiển. So với các giải pháp đã biết với nhiều bậc tự do, phương pháp luận của phương án thực hiện mà được mô tả ở đây làm giảm độ phức tạp trong vấn đề điều khiển theo trục tròn xoay của plasma FRC có một bậc tự do.

Sự kết hợp của các dạng sóng trong các dòng điện của cuộn dây, hoạt động cấp nhiệt liệu và công suất chùm trung hòa mà khiến cho plasma sự bất ổn định theo hướng trục tạo ra trường hợp điều khiển plasma mà đặt plasma vào tình huống sự bất ổn định theo hướng trục. Trường hợp này có thể được tạo chương trình trước nhờ sử dụng các kiến thức trước đó về mô phỏng hoặc thực nghiệm, hoặc sự phản hồi có điều khiển để duy trì trạng thái cân bằng vốn sự bất ổn định theo hướng trục. Vị trí plasma cần được điều khiển trong quá trình phóng một cách độc lập với điều khiển sự ổn định các đặc tính của sự cân bằng pha, ví dụ kế hoạch điều khiển cần làm việc hoặc cho plasma ổn định theo hướng trục hoặc plasma sự bất ổn định theo hướng trục, lên đến giới hạn. Plasma bất ổn định nhất theo hướng trục mà có thể được điều khiển có thời gian tăng so với thời gian bên ngoài của bề.

Trước khi quay lại hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC, thì sẽ mô tả các hệ thống và phương pháp để hình thành và duy trì các FRC hiệu suất cao với độ siêu ổn định cũng như hạt siêu mạnh, năng lượng và độ giữ thông lượng so với các FRC đã biết. Các FRC hiệu suất cao này mở đường cho toàn bộ các ứng dụng rộng rãi sử dụng các nguồn neutron nhỏ gọn (để sản xuất chất đồng vị trong y tế, xử lý chất thải hạt nhân, nghiên cứu các loại vật liệu, kiểm tra địa hình và chụp ảnh phóng xạ bằng neutron), các nguồn photon nhỏ gọn (để sản xuất và xử lý bằng

phương pháp hóa học), các hệ thống tách khối và làm giàu, và các lõi lò phản ứng để tổng hợp các hạt nhân nhẹ cho thế hệ năng lượng tương lai.

Các hệ thống phụ thuộc khác nhau và các chế độ vận hành đã được khảo sát để đánh giá xem liệu có một chế độ giữ cao hơn trong các FRC. Các nỗ lực này đã tạo ra các khám phá mang tính đột phá và sự phát triển của mô hình FRC hiệu suất cao mà đã được mô tả ở đây. Theo mô hình mới này, các hệ thống và phương pháp theo sáng chế kết hợp một loạt các ý tưởng và phương tiện mới để cải thiện một cách đột phá chế độ giữ FRC như được thể hiện trên Fig.1 cũng như tạo ra sự điều khiển trạng thái ổn định mà không tạo ra các hiệu ứng phụ bất lợi. Như được mô tả chi tiết hơn dưới đây, Fig.1 thể hiện sự giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 được mô tả dưới đây (xem Fig.2 và Fig.3), sự vận hành theo chế độ FRC hiệu suất cao (HPF) để hình thành và duy trì FRC ngược lại với sự vận hành theo chế độ CR đã biết để hình thành và duy trì FRC, và ngược lại với sự giam giữ hạt theo các chế độ đã biết để hình thành và duy trì FRC mà đã được sử dụng trong các thí nghiệm khác. Sáng chế sẽ mô tả chung và chi tiết các bộ phận riêng biệt có tính mới của hệ thống FRC 10 và các phương pháp cũng như các hiệu quả thu được của chúng.

Hệ thống FRC

Hệ thống chân không

Các Fig.2 và Fig.3 thể hiện hệ thống FRC theo sáng chế 10 dưới dạng sơ đồ. Hệ thống FRC 10 bao gồm bình giam trung tâm 100 được bao quanh bởi hai vùng hình thành ghim theta trường đảo đối 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 tạo ra để chứa chân không siêu cao và vận hành ở áp suất cơ sở thông thường bằng 10^{-8} torr ($133,32 \times 10^{-8}$ Pa). Các áp suất chân không này cần sử dụng các vành ăn khớp cho bơm kép giữa các bộ phận ăn khớp, các vòng chữ O bằng kim loại, các thành trong có độ sạch cao, cũng như chuẩn bị trạng thái bề mặt ban đầu kỹ lưỡng của tất cả các chi tiết trước khi lắp ráp, như làm sạch bằng phương pháp vật lý và hóa học mà được kế tiếp bởi công đoạn sấy chân không trong 24 giờ ở 250 °C và công đoạn làm sạch bằng cách 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 các hình vẽ từ 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 giữ 100 được tạo thành từ thép không gỉ để cho phép tạo nhiều cổng theo hướng xuyên tâm 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 đôi hướng tự nhiên.

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 đôi hướng tự nhiên.

Hệ thống từ tính chính 410 bao gồm nhiều chuỗi của các cuộn dây tựa như 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 giữ 100, các vùng hình thành 200 và các bộ đổi hướng 300, của hệ thống FRC 10. Các cuộn dây tựa như dc 412, 414 và 416 được nạp bởi các nguồn cấp công suất chuyển mạch tựa như dc và tạo ra các trường dịch chuyển từ cơ bản khoảng 0,1T trong buồng giam giữ 100, các vùng hình thành 200 và các bộ đổi hướng 300. Bên cạnh các cuộn dây tựa như dc 412, 414 và 416, hệ thống từ tính chính 410 bao gồm các cuộn dây gương tựa như dc 420 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) giữa hoặc là đầu cuối của buồng giam giữ 100 hoặc là các vùng hình thành liên kế 200. Các cuộn dây gương tựa như 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 cắm gương 440, được định vị giữa mỗi vùng trong số các vùng hình thành 200 và các bộ đổi hướng 300. Các chốt cắm gương 440 bao gồm các cuộn dây gương tựa như dc nhỏ gọn 430 và các cuộn dây chốt cắm gương 444. Các cuộn dây gương tựa như 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 cắm gương 444. Các cuộn dây chốt cắm 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 dòng plasma tạo luồng cuối 454 vào trong các buồng xa 310 của các bộ đổi hướng 300. Cuối cùng, bộ “các anten” cuộn dây hình yên ngựa 460 (xem Fig.15) được định vị bên ngoài buồng giam giữ 100, hai phần trên mỗi cạnh của mặt phẳng giữa, và được nạp vào trong các nguồn cấp công suất dc. Các anten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể được định cấu hình để tạo ra trường từ lưỡng cực hoặc tứ cực gần như tĩnh có độ lớn khoảng 0,01T để điều khiển các độ bất ổn định quay và/hoặc điều khiển dòng electron. Các anten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể tạo ra các trường từ linh động mà hoặc đối xứng hoặc bất đối xứng qua mặt phẳng giữa của máy, phụ thuộc vào hướng của các dòng được áp dụng.

Hệ thống tạo nguồn xung

Hệ thống tạo nguồn 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 từ Fig.4 đến Fig.6 thể hiện 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. Tóm 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. Sự vận hành phối hợp của các thành phần này được thực hiện 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. Ưu điểm của thiết kế được môđun hóa này là nó có thể vận hành linh động: 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 giữ 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 bẫy 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 ngấm 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 bẫy 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 năng lượng hơn với ít sự phân tán chùm hơn) có thể được phun vào trong các trường từ thấp hơn mà theo cách khác, là cần thiết để bẫy các chùm này. Đó là do thực tế là thành phần theo phương vị của năng lượng xác định 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.

Quay lại Fig.3D và Fig.3E, kết cấu thay thế khác bao gồm các bộ đổi hướng bên trong 302 ngoài các bộ phận phun chùm có góc 615. Các bộ đổi hướng bên trong 302 được định vị giữa các vùng hình thành 200 và buồng giam giữ 100, và được tạo kết cấu và hoạt động hầu như giống với các bộ đổi hướng bên ngoài 300. Các bộ đổi hướng bên trong 302, mà chứa các cuộn dây từ chuyển nhanh trong đó, được dừng hoạt động một cách hiệu quả trong quá trình hình thành để cho phép các FRC hình thành đi qua các bộ đổi hướng bên trong 302 khi FRC hình thành tịnh tiến về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100. Do các FRC hình thành đi qua các bộ đổi hướng bên trong 302 vào trong buồng giam giữ 100, các bộ đổi hướng bên trong được kích hoạt để hoạt động hầu như giống với các bộ đổi hướng bên ngoài và cách ly buồng giam giữ 100 từ các vùng hình thành 200.

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, and HL-2A,” Proceedings của 26th Fusion Science and 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 ($D \sim 1\text{mm}$, $L \sim 1 - 2\text{ mm}$) 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 rằng khí quầng sáng là vấn đề nghiêm trọng trong tất cả 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 trường từ 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. Để đạt được mục đích 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 giữ (hoặc bình) 100 và các bộ phận chuyển hướng 300 và 302 với các màng (độ dày cỡ chục micro mét) của Ti và/hoặc Li. Các lớp phủ thu được 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 cắm 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 duy trì. Bộ cuộn dây gương thứ nhất 420 tạo ra các trường từ 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 trường từ rất cao (giữa 2 tới 4T với các thời gian tăng từ khoảng 10 tới 20ms). Các cuộn dây được tạo xung gương nhỏ gọn nhất 444 là các kích cỡ theo hướng xuyên tâm nhỏ gọn, cỡ 20cm và chiều dài tương tự, khi so sánh với cỡ mét hoặc dài hơn và thiết kế bánh kép của các cuộn dây giam 412, 414 và 416. Mục đích của các chốt cắm gương 440 là để nêu 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.

Theo kết cấu thay thế được thể hiện trên Fig.3D và Fig.3E, tập hợp các cuộn dây bó hẹp biên dạng thấp 421 là các vị trí giữa các bộ đổi hướng bên trong 302 và các vùng hình thành 200.

Các súng plasma hướng 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 chông 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 trường từ bên trong súng giữa 0,5T đến 2,3T.

Các luồng plasma từ súng có thể xâm nhập các trường từ 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 giữ 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 định thiên

Việc chênh lệch điện của các bề mặt thông lượng mở có thể tạo ra các thế theo hướng xuyên tâm tăng dịch chuyển $E \times B$ theo góc phương vị tạo ra cơ chế điều khiển, tương tự với việc chỉnh núm, 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 chồng 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 trường từ 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 duy trì 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 kilo-hertz) được sinh ra từ bộ các anten 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 $5\mu s$. 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 xuyên tâm 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 phần với bán kính bộ phận tách khoảng 0,4m và mở rộng theo hướng trục khoảng 3m. Các đặc điểm khác là các trường từ 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 duy trì 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 ban đầu.

Dữ liệu thực nghiệm của việc vận hành không được duy trì - 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 xuyên tâm và hướng trục, trước hợp nhất cuối cùng để tạo thành FRC 450.

Cả động lực học theo hướng xuyên tâm và theo hướng trục của việc hợp nhất FRC 450 đều có chứng cứ bởi các đo đạc 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 duy trì 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 trường từ 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 $z = 0$. Do 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 xuyên tâm 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 yêu 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 đạc 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 xuyên tâm. 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 giảm.

Việc vận hành được duy trì - 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

Trước tiên, các hạt trung hòa nhanh (H) được phun vuông góc với B_z thành chùm từ tám bộ 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 trường từ 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 xuyên tâm ra bên ngoài bộ phận tách do trường từ 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 phản trung hòa cạnh và cho phép tạo dòng ion nhanh cần thiết.

Hoạt động phun hạt

Khi tập hợp ion nhanh đáng kể được tạo ra bên trong FRC 450, với nhiệt độ của electron cao hơn và tuổi thọ của FRC dài hơn, các hạt H hoặc D được đông cứng được phun vào trong FRC 450 từ bộ phận phun hạt 700 để duy trì lượng dư hạt FRC của FRC 450. Các thang thời gian tiêu mòn là đủ ngắn để tạo ra nguồn hạt FRC đáng kể. Tốc độ này cũng có thể được tăng nhờ mở rộng diện tích bề mặt của các tấm được phun bằng cách phá các hạt riêng biệt thành các mảnh nhỏ hơn trong khi ở trong các tang hoặc các ống phun của bộ phận phun hạt 700 và trước khi đi vào buồng giam giữ 100, bước mà có thể được thực hiện bằng cách tăng lực ma sát giữa hạt và các thành của ống phun bằng cách thắt bán kính cong của đoạn cuối cùng của ống phun ngay trước khi đi vào trong buồng giam giữ 100. Do thay đổi trình tự bắn và tốc độ của 12 tang (các ống phun) cũng như sự phân mảnh, có thể điều hướng hệ thống phun hạt 700 để chỉ tạo ra mức mong muốn của sự duy trì lượng dư hạt. Sau đó, sự điều hướng này giúp duy trì áp lực động học nội trong FRC 450 và sự vận hành đã được duy trì và tuổi thọ của FRC 450.

Khi các nguyên tử đã bị phá hủy gặp plasma mạnh trong FRC 450, các nguyên tử này sẽ được ion hóa hoàn toàn. Sau đó thành phần plasma lạnh sinh ra được gia nhiệt kiểu va chạm bằng plasma FRC ban đầu. Năng lượng cần thiết để duy trì nhiệt độ FRC mong muốn được cung cấp hoàn toàn bởi các bộ phun chùm trung hòa 600. Trong trường hợp này, các bộ phận phun hạt 700 cùng với các bộ phun chùm trung hòa 600 tạo ra hệ thống để duy trì trạng thái ổn định và duy trì FRC 450.

Bộ phun CT

Là phương án thay thế cho bộ phận phun hạt, bộ phun CT (CT: compact toroid – cuộn dây hình xuyên) được trang bị, chủ yếu để cấp nhiên liệu cho các plasma FRC. Bộ phun CT 720 bao gồm súng plasma đồng trục đã được từ hóa (MCPG: magnetized coaxial plasma-gun), như được thể hiện trên Fig.21, súng này bao gồm điện cực trong 722 và điện cực ngoài 724 hình trụ đồng trục, cuộn chính lưu được bố trí bên trong với điện cực trong 726 và công tắc ngắt điện 728 ở đầu đối diện với đầu xả của bộ

phun CT 720. Khí được phun qua cửa phun khí 730 vào trong khoảng trống giữa điện cực trong 722 và điện cực ngoài 724 và Plasma dạng Spheromak được tạo ra từ đó nhờ xả và đẩy ra khỏi súng bởi lực Lorentz. Như được thể hiện trên Fig.22A và Fig.22B, hai bộ phun CT 720 được lắp với bề giam 100 gần và ở các phía đối diện của mặt phẳng giữa của bề giam 100 để phun các CT vào trong plasma FRC trung tâm bên trong bề giam 100. Đầu xả của các bộ phun CT 720 được hướng về phía mặt phẳng giữa của bề giam 100 theo một góc với đường trục dọc của bề giam 100 tương tự với các bộ phun chùm trung hòa 615.

Theo các phương án thực hiện thay thế, bộ phun CT 720, như được thể hiện trên Fig.23A và Fig.23B, bao gồm ống làm lệch 740 bao gồm ống hình trụ dài lắp với đầu xả của bộ phun CT 720. Như đã được mô tả, ống làm lệch 740 bao gồm các cuộn ống làm lệch 742 được bố trí quanh và cách nhau theo hướng trục dọc theo ống. Các cửa chắn đoán 744 được bố trí dọc theo chiều dài của ống.

Các ưu điểm của bộ phun CT 720 bao gồm: (1) điều khiển và làm ổn định lượng dư hạt theo CT đã được phun; (2) plasma ấm được lắng xuống (thay cho các hạt làm đông lạnh); (3) hệ thống có thể được vận hành theo chế độ rep-rate cho phép cấp nhiên liệu liên tục; (4) hệ thống cũng có thể hồi phục một số thông lượng từ khi các CT đã được phun mang trường từ được gắn chìm. Theo phương án về sử dụng thử nghiệm, đường kính trong của điện cực ngoài là 83,1 mm và đường kính ngoài của điện cực trong là 54,0 mm. Tốt hơn là, bề mặt của điện cực trong 722 được phủ vonfram để ngăn các tạp chất thoát ra khỏi điện cực 722. Như đã được mô tả, cuộn chỉnh lưu 726 được lắp phía trong điện cực trong 722.

Trong các thực nghiệm gần đây, tốc độ truyền CT siêu âm lên đến ~ 100 km/s đã đạt được. Các thông số plasma cơ bản khác là như sau: mật độ electron $\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, nhiệt độ electron $\sim 30\text{-}50$ eV, và lượng dư hạt bằng $\sim 0,5\text{--}1,0 \times 10^{19}$. Áp suất động lực cao của CT cho phép plasma được phun xuyên sâu vào trong FRC và làm lắng các hạt bên trong bộ phận tách. Trong các thực nghiệm gần đây, việc cấp nhiên 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 cấp nhiên liệu có thể được thực hiện mà không làm gián đoạn plasma FRC.

Các cuộn đặt hai bên

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 tính 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. Trường từ theo hướng xuyên tâm 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 trường từ theo hướng xuyên tâm để tạo ra lực phá vỡ theo phương vị trên các điện tử, $F_{\theta} = -\sigma V_{e\theta} \langle |B_r|^2 \rangle$. 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 trường từ cao (2T tới 4 T) với tổng năng lượng vừa phải (khoảng 100 kJ). Đối với việc hình thành của các trường từ 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 trường từ 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 lệch 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 giữ hạt ở lớp cạnh $\tau_{\parallel}$ tăng bởi khoảng lên tới cỡ biên độ. Việc cải thiện $\tau_{\parallel}$ làm tăng một cách đáng kể việc giam giữ hạt FRC.

Giả sử rằng tổn thất hạt phân tán theo hướng xuyên tâm (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 $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$, 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 $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$, 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 định thiên), 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 $\tau_{\parallel}$.

Sự cải thiện đáng kể trong $\tau_{||}$ 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 siết 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 cấm gương (Mirror Plug) nêu trên, nếu $\tau_{||}$ 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 cấm 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 $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2$ 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 đã 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 định thiên đảo ngược. Nếu được bật tại thời điểm $t < -2$ 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.

Định thiên điện

Việc điều khiển của biên dạng điện trường theo hướng xuyên tâm trong lớp cạnh 456 là có lợi theo nhiều cách cho khả năng ổn định và giam FRC. Theo các thành phần định thiên 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 xuyên tâm có thể được sinh ra qua lớp cạnh 456 ở ngay bên ngoài FRC 450. Các điện trường theo hướng xuyên tâm 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 vi phân bất kỳ giữa lớp cạnh 456 và lõi FRC 453 sau đó có thể được truyền vào phần bên trong của FRC plasma 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 định thiên 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 định thiên 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 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 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 đạc thô của việc định cỡ vật lý của máy) và ρ_i là bán kính larmor ion được nâng lên trong từ trường được tác dụng từ bên ngoài (đo đạc 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, $t < 0,5\text{ms}$ 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 electron (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 electron. 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 hòa 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 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 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.

Ổn định plasma và điều khiển vị trí hướng trục

Sau đây quay trở lại với các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng trục và sự điều khiển vị trí theo hướng trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC, Fig.24 là hình vẽ dạng sơ đồ đơn giản hóa để thể hiện phương án làm ví dụ thực hiện của sáng chế về cơ cấu điều khiển vị trí hướng trục 510. Plasma FRC quay 520 được thể hiện bên trong buồng giam giữ 100 có dòng plasma 522 và hướng dịch chuyển dọc trục 524. Trường cân bằng pha (không được thể hiện trên hình vẽ) được tạo ra bên trong buồng giam giữ 100 nhờ các thành phần tạo dòng đối xứng như các cuộn dây tựa như dc 412 (xem Fig.2 và Fig.3), chẳng hạn. Trường cân bằng pha không tạo ra lực liên kết mạng theo hướng dịch chuyển dọc trục 524, nhưng có thể được điều chỉnh để tạo ra plasma ổn định theo hướng ngang/hướng xuyên tâm hoặc plasma ổn định theo hướng trục. Đối với các mục đích của phương án thực hiện mà được mô tả ở đây, trường cân bằng pha được điều chỉnh để tạo ra plasma FRC ổn định theo hướng ngang/hướng xuyên tâm 520. Như đã lưu ý trên đây, điều này tạo ra sự bất

ổn định theo hướng trục và do vậy, sự dịch chuyển theo hướng trục của plasma FRC 520 theo hướng dịch chuyển dọc trục 524. Do plasma FRC 520 dịch chuyển theo hướng trục, nó gây ra các dòng cảm ứng 514 và 516 vốn chống lại sự đối xứng, tức là, theo các hướng ngược lại trên các thành của buồng giam giữ 100 ở mỗi phía của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100. Plasma FRC 520 sẽ cảm ứng các thành phần tạo dòng kiểu này trong cả bề và các cuộn dây bên ngoài. Các thành phần tạo dòng bất đối xứng 514 và 516 này tạo ra trường theo hướng xuyên tâm mà tương tác với dòng plasma có hình xuyên 522 để tạo ra lực ngược với sự dịch chuyển của plasma FRC 520, và kết quả của lực này là nó làm chậm sự dịch chuyển theo hướng trục của plasma. Các thành phần tạo dòng 514 và 516 này tiêu mòn dần theo thời gian, do suất điện trở của buồng giam giữ 100.

Các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531 mà được bố trí quanh buồng giam giữ 100 ở mỗi phía của mặt phẳng giữa tạo ra các thành phần tạo trường theo hướng xuyên tâm bổ sung vốn là do các dòng điện 532 và 534 được cảm ứng theo các hướng ngược lại trên các cuộn 530 và 531. Các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531 có thể bao gồm tập hợp các cuộn đối xứng trục mà có thể được định vị bên trong hoặc bên ngoài bề giữ 100. Các cuộn theo hướng xuyên tâm 530 và 531 được thể hiện sẽ được định vị bên ngoài bề giữ 100 tương tự với các cuộn dây tựa như dc 412 (xem Fig.2 và Fig.3). Mỗi cuộn dây trong số các cuộn dây 530 và 531, hoặc tập hợp các cuộn dây, có thể mang dòng điện khác với các cuộn dây ở phía đối diện của mặt phẳng giữa, nhưng các dòng là phản đối xứng đối với mặt phẳng giữa của bề giữ 100 và tạo ra kết cấu trường từ với $B_z \neq 0$, $B_r = 0$ dọc theo mặt phẳng giữa. Các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531 tạo ra thành phần trường bổ sung có hướng xuyên tâm mà tương tác với dòng plasma có hình xuyên 522 để tạo ra lực dọc trục. Lực dọc trục sau đó dịch chuyển plasma quay lại phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100.

Cơ cấu điều khiển 510 bao gồm hệ thống điều khiển được cấu hình để tác động lên dòng điện của cuộn dây tạo trường xuyên tâm để phục hồi tức thời vị trí plasma về phía mặt phẳng giữa trong khi làm giảm đến mức thấp nhất sự cường điệu và/hoặc các dao động xung quanh mặt phẳng giữa máy. Hệ thống điều khiển bao gồm

bộ xử lý lắp vận hành được với các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531, các cuộn dây tựa như dc 412, các nguồn cấp điện tương ứng của chúng, và các thành phần khác như các bộ cảm biến từ, đo vị trí plasma, vận tốc plasma, và các thành phần đo dòng cuộn dây chủ động. Bộ xử lý có thể được cấu hình để thực hiện các phép tính và phân tích đã được mô tả trong đơn này và có thể bao gồm hoặc lắp truyền thông được với một hoặc nhiều bộ nhớ bao gồm phương tiện đọc được bằng máy tính không tạm thời. Bộ xử lý có thể bao gồm hệ thống dựa trên bộ xử lý hoặc hệ thống dựa trên bộ vi xử lý chứa các hệ thống sử dụng các bộ vi điều khiển, máy tính với tập lệnh đơn giản hóa (RISC: Reduced Instruction Set Computer), các mạch tích hợp ứng dụng cụ thể (ASICs: application specific integrated circuits), các mạch logic và mạch khác bất kỳ hoặc bộ xử lý có khả năng thực thi các hàm mà đã được mô tả ở đây. Các ví dụ bên trên chỉ nhằm minh họa và không nhằm làm giới hạn theo cách bất kỳ định nghĩa và/hoặc ý nghĩa của thuật ngữ “bộ xử lý” hoặc “máy tính.”

Các chức năng của bộ xử lý có thể được thực hiện nhờ sử dụng các thủ tục phần mềm, các bộ phận phần cứng hoặc các kết hợp của chúng. Các bộ phận phần cứng có thể được thực hiện nhờ sử dụng các công nghệ khác nhau, ví dụ bao gồm các mạch tích hợp hoặc các phần tử điện tử rời rạc. Cụm xử lý thường bao gồm thiết bị lưu trữ bộ nhớ có thể đọc/ghi và cũng thường bao gồm phần cứng và/hoặc phần mềm để ghi và/hoặc đọc thiết bị lưu trữ bộ nhớ.

Bộ xử lý có thể bao gồm thiết bị tính toán, thiết bị nhập vào, cụm hiển thị và phần giao diện, ví dụ để truy cập internet. Máy tính hoặc bộ xử lý có thể bao gồm bộ vi xử lý. Bộ vi xử lý có thể được nối với bus truyền thông. Máy tính hoặc bộ xử lý cũng có thể bao gồm bộ nhớ. Bộ nhớ có thể bao gồm bộ nhớ truy cập ngẫu nhiên (RAM) và bộ nhớ chỉ đọc (ROM). Máy tính hoặc bộ xử lý cũng có thể bao gồm thiết bị lưu trữ, mà có thể là ổ đĩa cứng hoặc ổ lưu trữ di động như ổ đĩa mềm, ổ đĩa quang, và thiết bị tương tự. Thiết bị lưu trữ cũng có thể là phương tiện tương tự khác để tải các chương trình máy tính hoặc các lệnh khác vào máy tính hoặc bộ xử lý.

Bộ xử lý thực thi tập lệnh được chứa trong một hoặc nhiều phần tử lưu trữ, để xử lý dữ liệu nhập vào. Các phần tử lưu trữ cũng có thể lưu trữ dữ liệu hoặc thông

tin khác khi muốn hoặc khi cần. Phần tử lưu trữ có thể là dưới dạng nguồn thông tin hoặc phần tử bộ nhớ vật lý bên trong máy xử lý.

Vấn đề về điều khiển vị trí của trạng thái FRC ổn định hoặc không ổn định theo hướng trực sử dụng các bộ kích hoạt bằng cuộn dây có trường theo hướng xuyên tâm được giải quyết nhờ sử dụng một phần của lý thuyết điều khiển không tuyến tính được biết đến là điều khiển chế độ trượt. Hàm tuyến tính của các trạng thái hệ thống (bề mặt trượt) có tác dụng làm tín hiệu lỗi với hành vi (trượt) tiệm cận mong muốn. Bề mặt trượt được tạo ra nhờ sử dụng lý thuyết Liapunov để biểu diễn độ ổn định tiệm cận trên dải rộng của các thông số động FRC. Sau đó kế hoạch điều khiển đã được đề xuất có thể được sử dụng cho cả plasma ổn định và không ổn định theo hướng trực mà không cần điều chỉnh lại các thông số đã sử dụng trên bề mặt trượt. Đặc tính này là ưu điểm của sáng chế, như đã được nêu bên trên, do sự cân bằng pha có thể phải chuyển tiếp giữa các cân bằng pha ổn định và các cân bằng pha sự bất ổn định theo hướng trực trên các pha khác nhau của sự phóng điện FRC.

Cấu hình của kế hoạch điều khiển 500 được thể hiện trên Fig.25. Bộ lọc cho đi qua thấp hạn chế các tần số chuyển mạch bên trong dải tần điều khiển mong muốn. Tạo mẫu yêu cầu vòng lặp điều khiển số và truyền tín hiệu có độ trễ làm ví dụ được giả thiết. Tín hiệu lỗi (bề mặt trượt) là sự kết hợp tuyến tính của dòng cuộn dây, vị trí plasma và vận tốc plasma. Vị trí plasma và vận tốc của plasma thu được từ các phép đo từ tính bên ngoài. Các dòng điện trong các hệ thống có cuộn dây chủ động có thể được đo bằng các phương pháp tiêu chuẩn.

Các dòng cuộn dây và vị trí plasma được yêu cầu để thực hiện điều khiển vị trí. Vận tốc plasma được yêu cầu để cải thiện hiệu suất nhưng thông số này là tùy chọn. Hàm không tuyến tính của tín hiệu lỗi này (định luật điều khiển role) tạo ra các mức điện áp riêng cho mỗi cặp nguồn điện nối với các cuộn dây đối xứng qua mặt phẳng giữa. Các cuộn dây đối xứng qua mặt phẳng giữa được cấp các điện áp role có cùng cường độ nhưng có dạng ngược lại. Điều này tạo ra thành phần trường theo hướng xuyên tâm để hồi phục vị trí plasma về phía mặt phẳng giữa.

Để thể hiện khả năng thực hiện của kế hoạch điều khiển, mô hình plasma không linh động được sử dụng để mô phỏng các chế độ động của plasma. Mô hình

này sử dụng dạng hình học từ tính. Sự phân bố dòng plasma tương ứng với các cân bằng pha sự bất ổn định theo hướng trục với thời gian tăng bằng 2ms khi chỉ có plasma và bề được xét đến. Các nguồn cấp điện được giả sử là làm việc với các mức điện áp riêng, thường theo các bước 800 V.

Fig.26 thể hiện một số mô phỏng điều khiển plasma mà nhấn mạnh quan hệ giữa các điện áp được cấp cho các cuộn dây, và các thời gian ổn định vị trí plasma, cùng với dòng đỉnh của cuộn dây yêu cầu và các tỷ lệ dốc để đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa mà đã được dịch chuyển dọc trục khoảng 20cm. Các ví dụ về mô phỏng điều khiển vị trí hướng trục chế độ trượt này được thực hiện ở 0,3 T nhờ sử dụng bốn cặp các cuộn vi chỉnh ngoài. Bốn trường hợp được thể hiện tương ứng với các nguồn cấp điện có các mức điện áp riêng theo các bước bằng 200 V (hình vuông đặc), 400V (hình tròn đặc), 800 V (hình tam giác đặc) và 1600 V (hình vuông rỗng). Đối với tất cả bốn trường hợp dải tần điều khiển là 16 kHz và tần số lấy mẫu là 32 kHz. Vị trí plasma (hình vẽ trên), dòng điện trên cặp cuộn dây ngoài cùng (hình vẽ giữa) và tỷ lệ chênh lệch dòng điện của cuộn dây (hình vẽ dưới) được thể hiện. Sự dịch chuyển plasma được phép tăng một cách không ổn định cho tới khi nó đạt 20cm. Ở thời điểm này sự điều khiển hồi tiếp được áp dụng.

Các kết quả mô phỏng thể hiện rằng:

1. Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 5ms (các vết hình vuông đặc), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 0,5MA/s là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 200 V.
2. Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 2,3ms (các vết hình tròn đặc), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 1MA/s là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 400 V.
3. Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 1,3ms (các vết hình tam giác đặc), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 2MA/s là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 800 V.
4. Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 1,0ms (các vết hình vuông rỗng), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 4MA/s là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 1600 V.

Các dòng điện đỉnh cho tất cả các cuộn vi chỉnh cho trường hợp thứ ba nêu trên (trường hợp có tỷ lệ chênh lệch 2MA/s) cũng được thể hiện trên Fig.27 là hàm của vị trí cuộn vi chỉnh. Mô phỏng điều khiển vị trí hướng trục chế độ trượt các ví dụ được thực hiện ở 0,3 T nhờ sử dụng bốn cặp cuộn vi chỉnh ngoài dùng nguồn điện có ba mức điện áp (+800V,0,-800V), dải tần điều khiển bằng 16kHz và tần số lấy mẫu bằng 32 kHz. Để đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 1,3ms, tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 2MA/s được yêu cầu. Dòng điện đỉnh mà được yêu cầu trong tất cả các cặp cuộn nhỏ hơn 1,5kA. Tần số chuyển mạch thực tế cần có (khoảng 2kHz) thấp hơn dải tần điều khiển hệ thống.

Hệ thống điều khiển cũng có thể được thực hiện trên bề mặt đích vốn là hàm của dòng điện của cuộn và vận tốc plasma độc lập, không có vị trí plasma. Trong trường hợp này vòng lặp điều khiển vị trí hướng trục chỉ tạo ra độ ổn định của các động lực có hướng trục, mà không điều khiển. Điều này có nghĩa là plasma ở trong trạng thái giả bền và có thể chảy chậm dọc theo đường trục của nó. Sau đó sự điều khiển vị trí được thực hiện sử dụng vòng lặp hồi tiếp bổ sung để điều khiển các khe plasma giữa bộ tách plasma và bể, do vậy nó thực hiện việc tạo hình dạng plasma và điều khiển vị trí một cách đồng thời.

Thiết bị giam giữ plasma khác trong đó các hệ thống điều khiển tương tự được sử dụng là tokamak. Để duy trì sự giam giữ plasma, dòng plasma trong tokamak phải được giữ trong giới hạn dưới và giới hạn trên mà phần lớn góp phần vào mật độ plasma và trường hình xuyên, một cách tương ứng. Để vận hành với mật độ plasma cao dòng plasma được được tăng. Đồng thời trường poloidal field phải được giữ càng thấp càng tốt sao cho hệ số an toàn q lớn hơn $q=2$. Yêu cầu này đạt được bằng cách kéo dài plasma theo hướng trục của máy, cho phép làm thích hợp dòng plasma lớn (và do đó, cho phép mật độ plasma cao) mà không làm trường từ bao quanh tăng cao hơn giới hạn an toàn của nó. Các plasma được kéo dài này là không ổn định dọc theo hướng trục của máy (đã biết trong biệt ngữ tokamak là phương thẳng đứng), và cũng yêu cầu các cơ cấu ổn định plasma. Việc điều khiển vị trí plasma thẳng đứng trong tokamaks cũng được hồi phục nhờ sử dụng tập hợp các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm, do vậy nó hầu như giống với vấn đề điều khiển vị trí RFC. Tuy nhiên các nguyên nhân

mà yêu cầu làm ổn định trong tokamak và FRC là khác nhau. Trong tokamak sự bất ổn định plasma theo phương thẳng đứng là sự bất lợi cần được khắc phục để vận hành với dòng plasma lớn, điều này yêu cầu sự kéo dài plasma để vận hành với trường hình xuyên cao. Trong trường hợp của FRC, sự bất ổn định plasma là sự bất lợi cần được khắc phục để thu được sự ổn định theo phương ngang. Các tokamak có trường hình xuyên để làm ổn định cấu hình, do vậy chúng không cần làm ổn định theo phương ngang.

Các phương án thực hiện làm ví dụ được đưa ra ở đây đã được mô tả trong đơn sáng chế Mỹ tạm thời số 62/255258 và đơn sáng chế Mỹ tạm thời số 62/309344, mà toàn bộ nội dung sẽ được kết hợp bằng cách viện dẫn.

Tuy nhiên, các phương án thực hiện làm ví dụ được đưa ra ở đây, chỉ nhằm mục đích làm các ví dụ minh họa và không làm giới hạn sáng chế theo cách bất kỳ.

Tất cả các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng, và các bước đã được mô tả đối với phương án thực hiện bất kỳ mà được đưa ra ở đây được dự tính là có thể kết hợp và thay thế một cách tùy ý với phần tương ứng từ phương án thực hiện khác bất kỳ. Nếu dấu hiệu, chi tiết, bộ phận, chức năng, hoặc bước cụ thể được mô tả chỉ cho một phương án thực hiện, nhưng cần hiểu rằng dấu hiệu, chi tiết, bộ phận, chức năng hoặc bước đó có thể được sử dụng với mỗi phương án thực hiện khác mà đã được mô tả ở đây trừ khi được chỉ ra một cách cụ thể theo hướng khác. Do đó, đoạn mô tả này có tác dụng làm cơ sở tiền đề và phần hỗ trợ bằng văn bản cho phần mở đầu của các điểm yêu cầu bảo hộ, ở thời điểm bất kỳ, mà kết hợp các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng và các bước từ các phương án thực hiện khác nhau, hoặc thay thế các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng và các bước từ một phương án thực hiện với các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng và các bước của phương án khác, ngay cả nếu phần mô tả sau đây không nêu ra một cách rõ ràng, trong trường hợp cụ thể, thì các kết hợp hoặc thay thế này cũng có thể được thực hiện. Phần mô tả trích dẫn của mỗi sự kết hợp và thay thế có thể có là việc quá phiền phức, đặc biệt là chỉ cần khả năng cho phép của mỗi và mọi sự kết hợp và thay thế sẽ hoàn toàn được xác định bởi người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật ngay khi đọc bản mô tả này.

Trong nhiều trường hợp, các thực thể đã được mô tả ở đây sẽ được lắp với các đối tượng khác. Cần hiểu rằng các thuật ngữ “lắp” và “nối” (hoặc dạng bất kỳ của chúng) được sử dụng dưới dạng hoán đổi một cách linh động ở đây và, trong cả hai trường hợp, đều có nghĩa là ghép trực tiếp hai đối tượng (không cần các thành phần xen giữa không đáng kể bất kỳ (ghép tạt)) và ghép gián tiếp hai đối tượng (với một hoặc nhiều thành phần pha tạt). Trong trường hợp các đối tượng được thể hiện dưới dạng ghép trực tiếp với nhau, hoặc được mô tả dưới dạng ghép không cần thành phần pha tạt bất kỳ, cần hiểu rằng các đối tượng này cũng có thể được ghép trực tiếp với nhau trừ trường hợp có mô tả rõ ràng khác.

Mặc dù các phương án thực hiện có thể có các biến thể và các phương án thay thế khác nhau, 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 các phương án thực hiện này không bị giới hạn ở dạng bộc lộ cụ thể, mà ngược lại, các phương án thực hiện này là để bao hàm tất cả các biến thể, phương án tương đương và phương án thay thế nằm trong phạm vi của sáng chế. Ngoài ra, các dấu hiệu, các chức năng, các bước hoặc các chi tiết bất kỳ của các phương án thực hiện có thể được viện dẫn hoặc bổ sung vào các điểm yêu cầu bảo hộ, cũng như các giới hạn phủ định mà định ra phạm vi bảo hộ của các điểm yêu cầu bảo hộ bởi các dấu hiệu, các chức năng, các bước hoặc các chi tiết không nằm trong phạm vi của sáng chế.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Phương pháp làm ổn định plasma cấu hình trường ngược (FRC) bao gồm các bước: tạo ra plasma FRC được định vị dọc theo đường trục dọc của buồng giam giữ (100) liền kề mặt phẳng giữa của buồng giam giữ (100) bằng cách tạo ra trường từ FRC quanh plasma quay trong buồng giam giữ (100), và làm ổn định plasma FRC theo phương hướng xuyên tâm vuông góc với đường trục dọc để định vị plasma FRC đối xứng trục qua đường trục dọc này bằng cách điều chỉnh trường từ tác động mà được tạo ra bên trong buồng giam giữ (100) nhờ các thành phần tạo dòng đối xứng để tạo ra sự ổn định theo hướng xuyên tâm và sự bất ổn định theo hướng trục trong plasma FRC; khác biệt ở chỗ, plasma FRC được làm ổn định theo phương dọc trục dọc theo đường trục dọc bằng cách tạo các trường từ xuyên tâm thứ nhất và thứ hai, trong đó các trường từ xuyên tâm thứ nhất và thứ hai tương tác với plasma FRC để di chuyển theo hướng trục plasma FRC để định vị plasma FRC đối xứng trục qua mặt phẳng giữa.
2. Phương pháp theo điểm 1, trong đó trường từ tác động được tạo ra bên trong buồng (100) bởi các cuộn dây tựa như dc (412) mở rộng quanh buồng (100).
3. Phương pháp theo điểm 1 hoặc 2, trong đó bước làm ổn định plasma FRC bao gồm bước điều khiển vị trí của plasma.
4. Phương pháp theo điểm 3, trong đó bước điều khiển vị trí của plasma FRC bao gồm bước điều khiển các phép đo từ kết hợp với plasma FRC.
5. Phương pháp theo điểm 3 hoặc 4, trong đó trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai được tạo ra do các dòng được cảm ứng theo các hướng ngược lại trong các cuộn theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai (530, 531) được định vị quanh buồng giam giữ (100), trong đó còn bao gồm bước đo dòng điện trong các cuộn dây theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai (530, 531).
6. Phương pháp theo điểm 5, trong đó phương pháp còn bao gồm bước điều khiển vận tốc của plasma FRC.

7. Phương pháp theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 1 đến 5, trong đó phương pháp còn bao gồm bước duy trì plasma FRC ở hoặc quanh trị số không đổi mà không bị phân hủy do phun các chùm của các nguyên tử trung hòa nhanh từ bộ phun chùm trung hòa (600, 615) vào trong plasma FRC theo một góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ (100) và phun plasma hình xuyên thu gọn vào trong plasma FRC.

8. Phương pháp theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 1 đến 7, trong đó bước tạo thành plasma FRC bao gồm việc tạo thành plasma FRC hình thành trong vùng hình thành (200) được gắn với đầu cuối của buồng giam giữ (100) và tăng tốc plasma FRC hình thành về phía mặt phẳng giữa của buồng (100) để tạo thành plasma FRC.

9. Phương pháp theo điểm 8, trong đó bước tạo thành plasma FRC bao gồm một trong số: việc tạo thành plasma FRC hình thành trong khi tăng tốc plasma FRC hình thành về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ (100) hoặc việc tạo thành plasma FRC hình thành và sau đó tăng tốc plasma FRC hình thành về phía mặt phẳng giữa của buồng (100).

10. Phương pháp theo điểm 8, trong đó phương pháp còn bao gồm bước dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ (452, 455) của plasma FRC vào trong các bộ đổi hướng (300,302) lắp với các đầu của các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai (200).

11. Phương pháp theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 1 đến 10, trong đó phương pháp còn bao gồm bước điều hòa các bề mặt trong của buồng giam giữ (100), các vùng hình thành (200), và các bộ đổi hướng (300,302) nhờ hệ thống hút thu khí (800).

12. Phương pháp theo điểm 11, trong đó hệ thống hút thu khí (800) bao gồm một trong số hệ thống lắng Titan (810) và hệ thống lắng Liti (820) hoặc phương pháp còn bao gồm bước phun plasma theo hướng trục vào trong plasma FRC từ các súng plasma được gắn theo hướng trục (350).

13. Phương pháp theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 1 đến 12, trong đó phương pháp còn bao gồm bước điều khiển biên dạng điện trường theo hướng xuyên tâm trong lớp cạnh (456) của plasma FRC.

14. Hệ thống để tạo ra và làm ổn định plasma cấu hình đảo ngược trường (FRC: field reversed configuration) mà được tạo cấu hình để thực hiện phương pháp theo điểm 1, hệ thống này bao gồm:

buồng giam giữ (100),

các vùng hình thành plasma FRC đối nhau theo hướng kính thứ nhất và thứ hai (200) lắp với buồng giam giữ (100), vùng hình thành (200) bao gồm các hệ thống hình thành được môđun hóa để tạo ra plasma FRC và dịch chuyển plasma FRC về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ (100),

các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai (300, 302) lắp với các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai (200), các súng plasma hướng trục thứ nhất và thứ hai (350) lắp vận hành với các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai (300, 302), các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai (200) và buồng giam giữ (100),

các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa (600, 615) được lắp với buồng giam giữ (100) và được định hướng để phun các chùm nguyên tử trung hòa về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ (100) với góc nhỏ hơn góc vuông với đường trục dọc của buồng giam giữ (100),

hệ thống từ tính (400) bao gồm các cuộn dây tựa như dc (412, 414) được bố trí quanh buồng giam giữ (100), các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai (200), và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai (300, 302), tập hợp thứ nhất và thứ hai của các cuộn dây gương tựa như dc (420, 430) được định vị giữa buồng giam giữ (100) và các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai (200), và các chốt cấm gương thứ nhất và thứ hai (440) được định vị giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai (200) và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai (300, 302),

hệ thống hút thu khí (800) lắp với buồng giam giữ (100) và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai (300, 302),

khác biệt ở chỗ, hệ thống còn bao gồm:

tập hợp thứ nhất và thứ hai của các cuộn dây tạo trường từ theo hướng xuyên tâm (530,531) được cấu hình để tạo ra trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai bên trong buồng (100), và

hệ thống điều khiển (224) lắp vận hành với các cuộn dây tựa như dc (412,414) và tập hợp các cuộn dây tạo trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai (530,531),

hệ thống điều khiển (224) bao gồm bộ xử lý lắp với bộ nhớ bất biến bao gồm các lệnh mà khi được thực thi thì làm cho bộ xử lý điều hướng trường từ mà được tạo ra bởi các cuộn dây tựa như dc (412,414) và tập hợp các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai (530, 531) để làm ổn định plasma FRC theo phương hướng xuyên tâm vuông góc với đường trục dọc của buồng (100) và để định vị plasma FRC đối xứng trục qua đường trục dọc này và theo hướng trục dọc theo đường trục dọc này để định vị plasma FRC đối xứng trục qua mặt phẳng giữa.

15. Hệ thống theo điểm 14, trong đó hệ thống còn được tạo cấu hình để tạo ra plasma FRC và duy trì plasma FRC tại hoặc quanh trị số không đổi mà không bị phân rã trong khi các chùm nguyên tử trung hòa được phun vào trong plasma FRC hoặc trong đó các trường từ xuyên tâm thứ nhất và thứ hai là phản đối xứng qua mặt phẳng giữa.

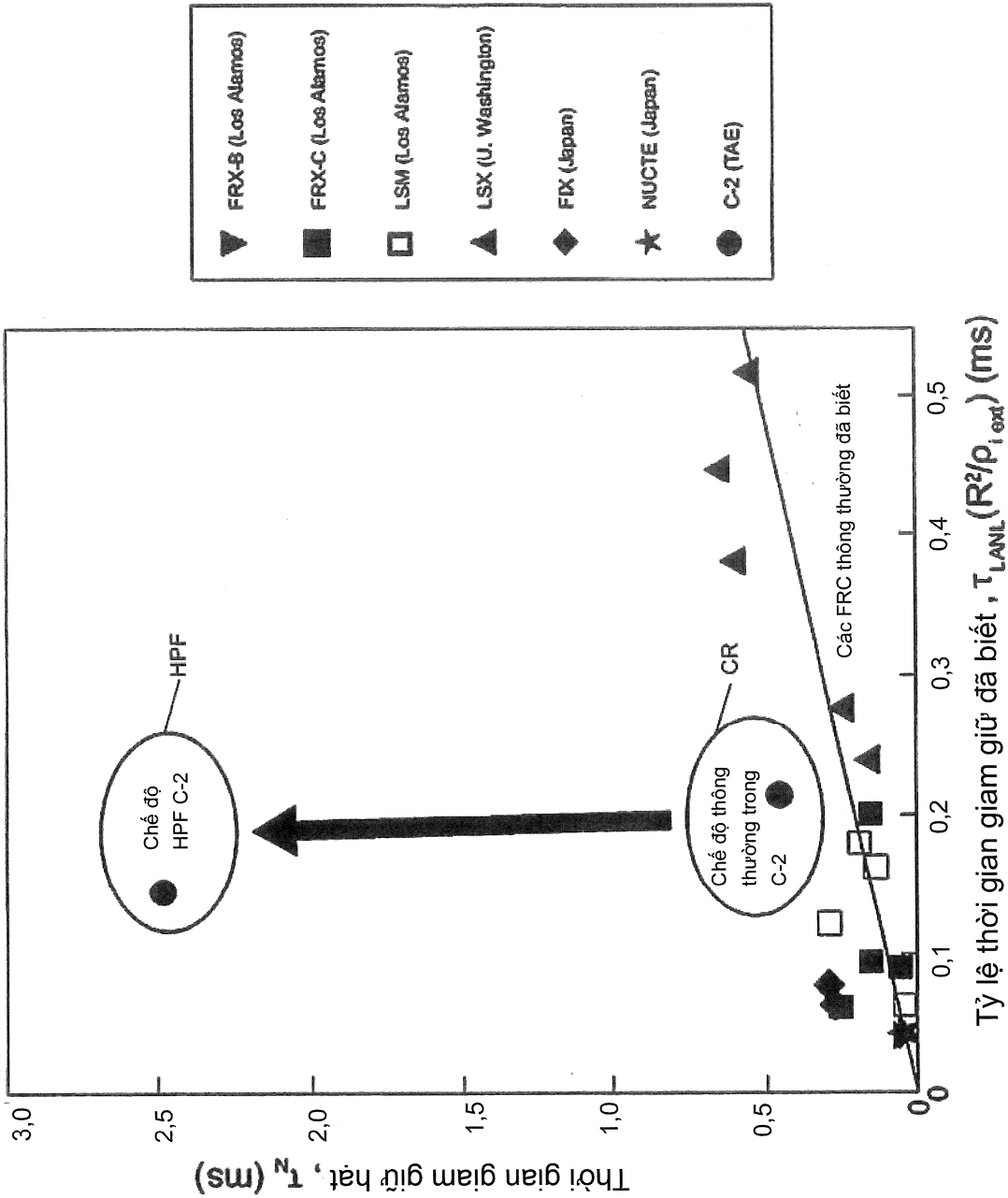


FIG. 1

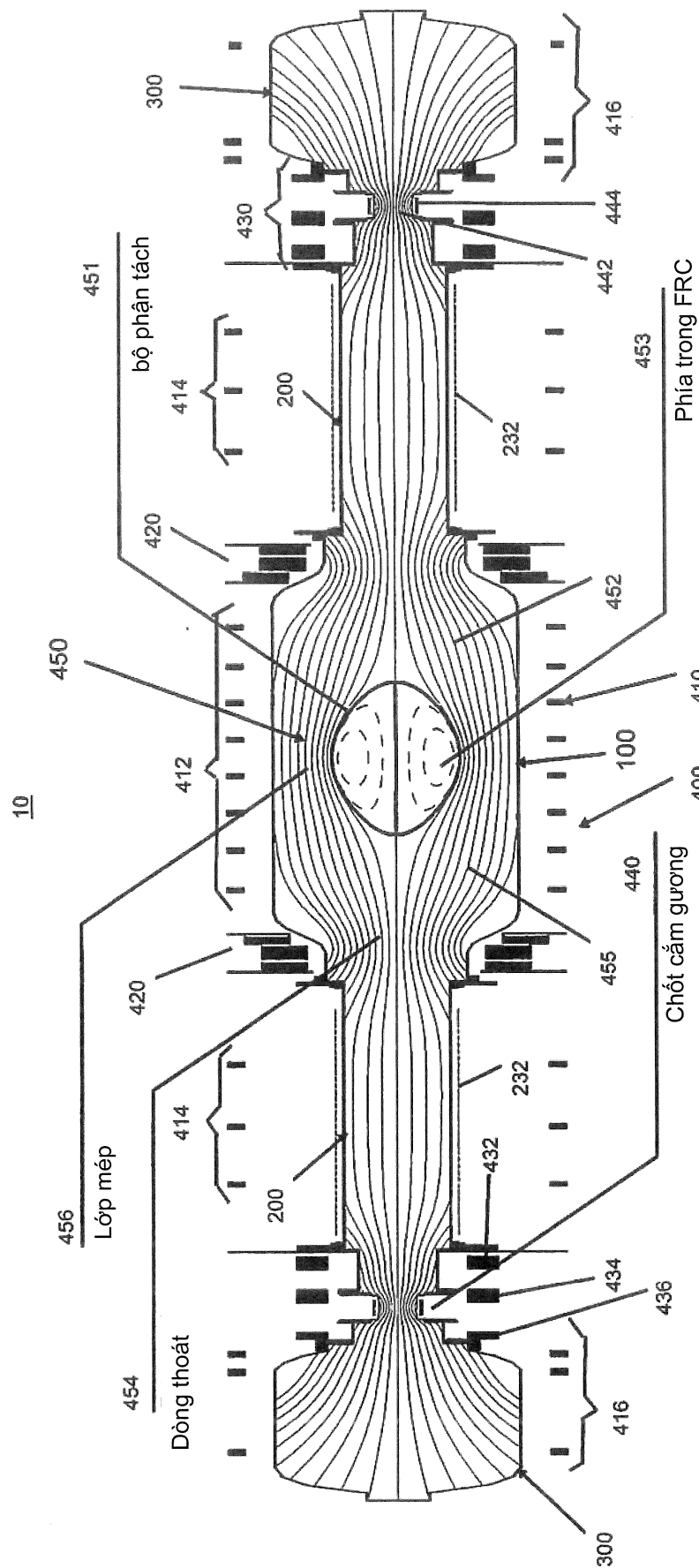
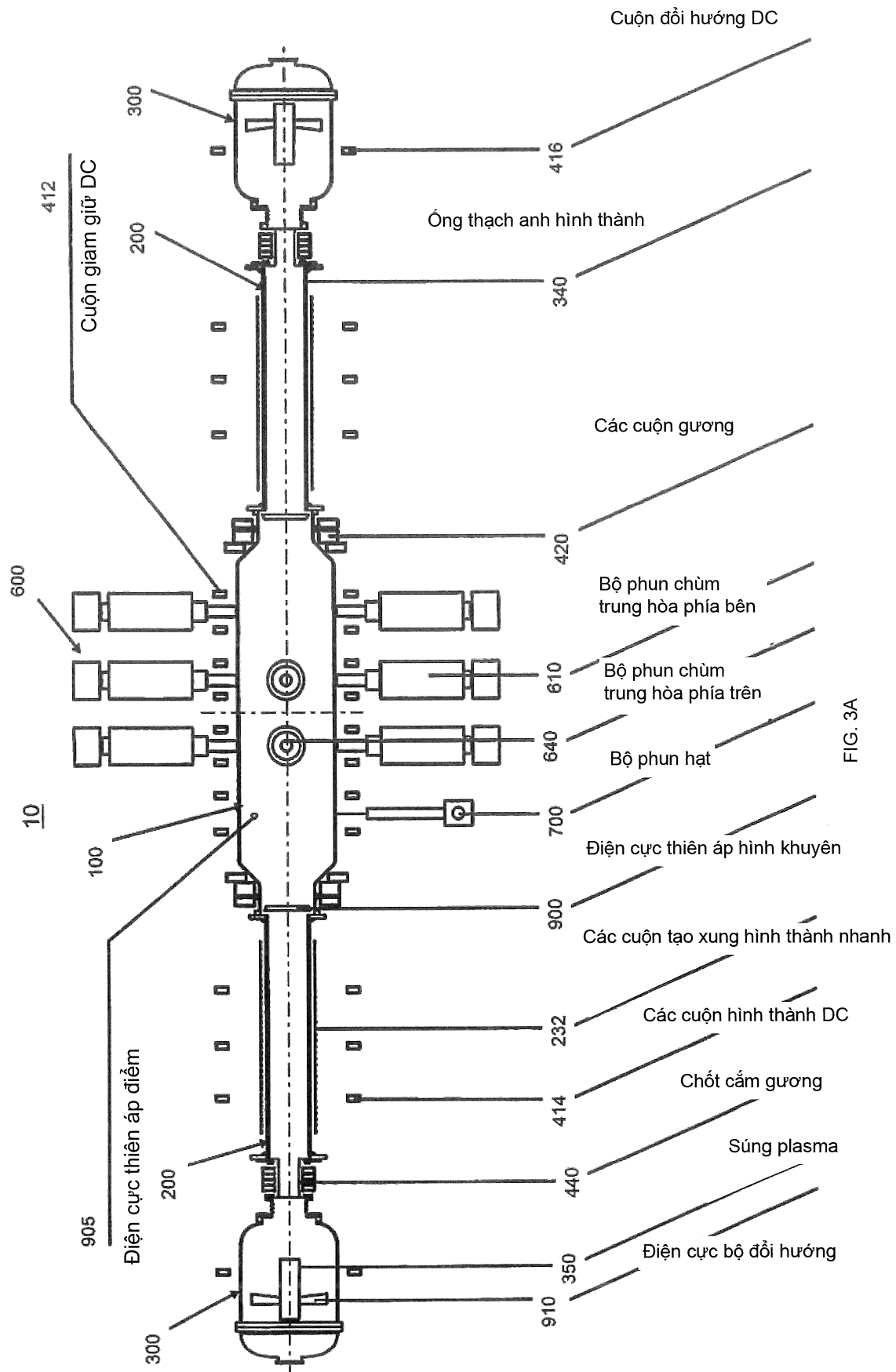


FIG. 2



4/30

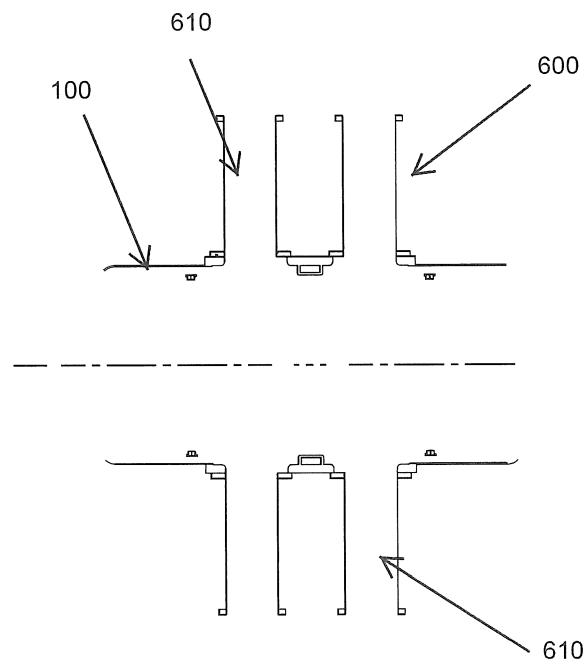


FIG. 3B

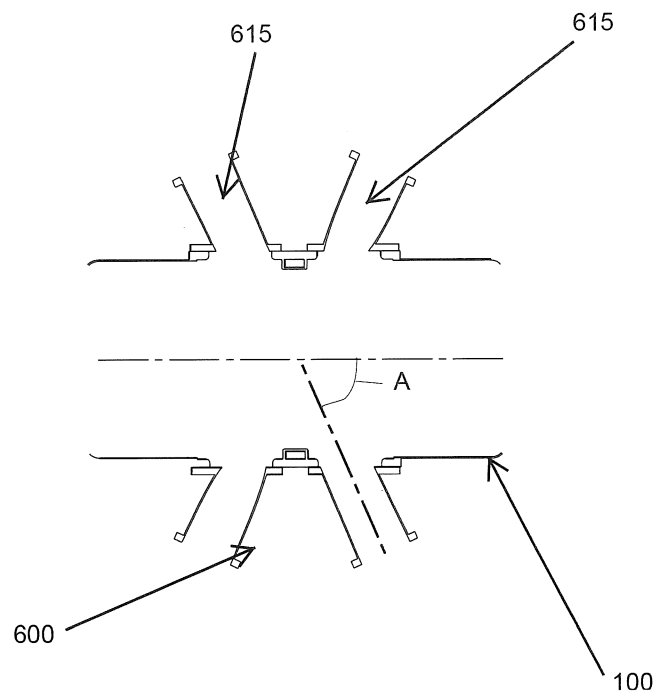


FIG. 3C

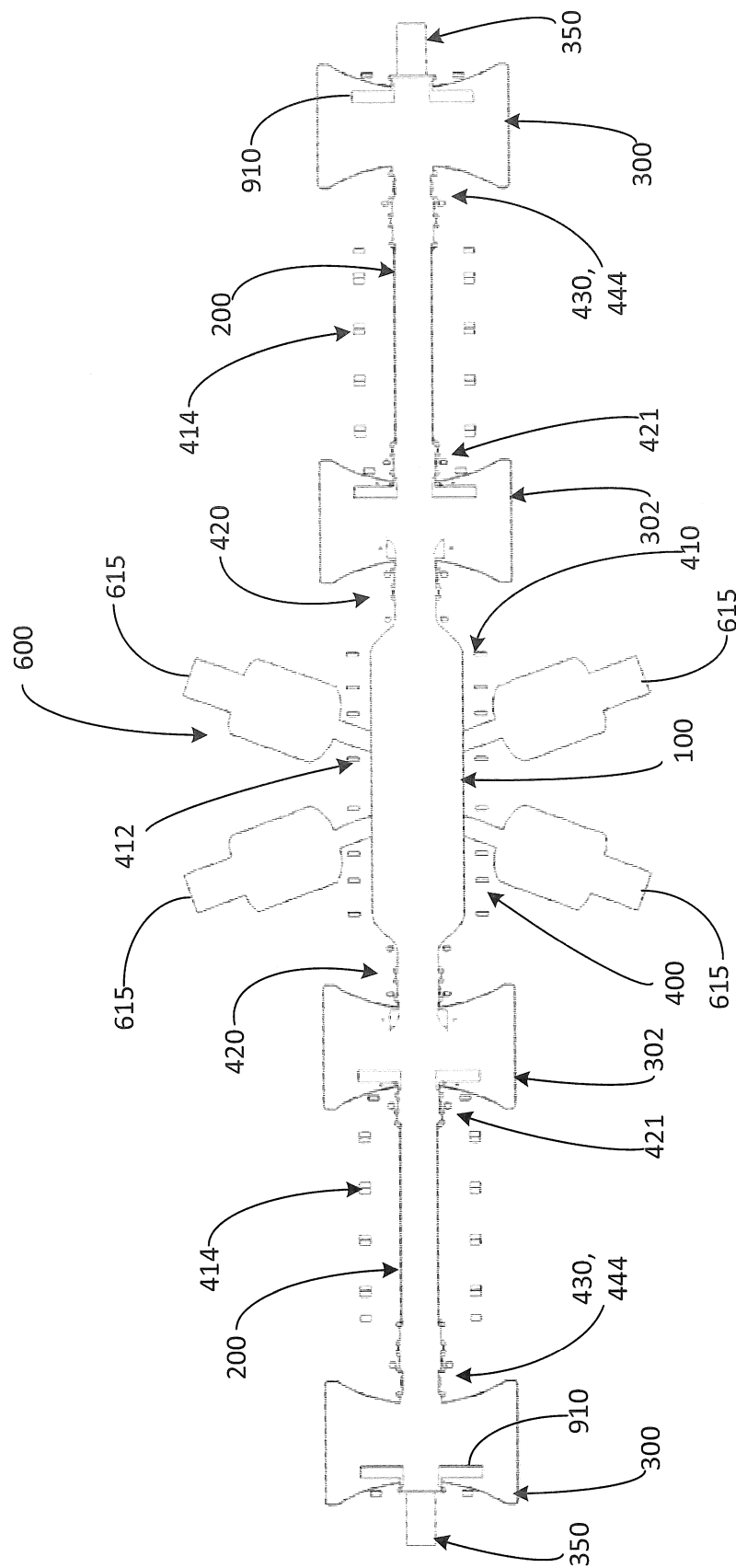


FIG. 3D

6/30

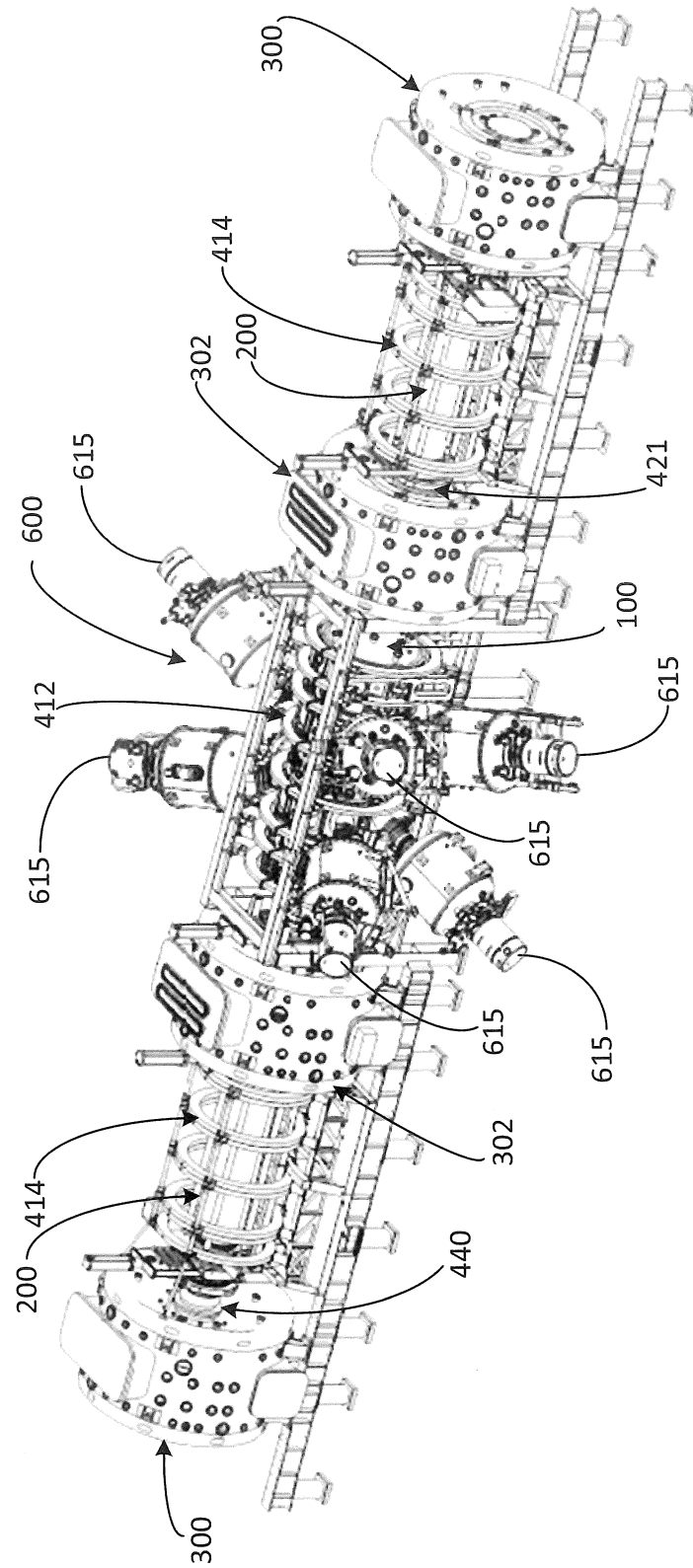


FIG. 3E

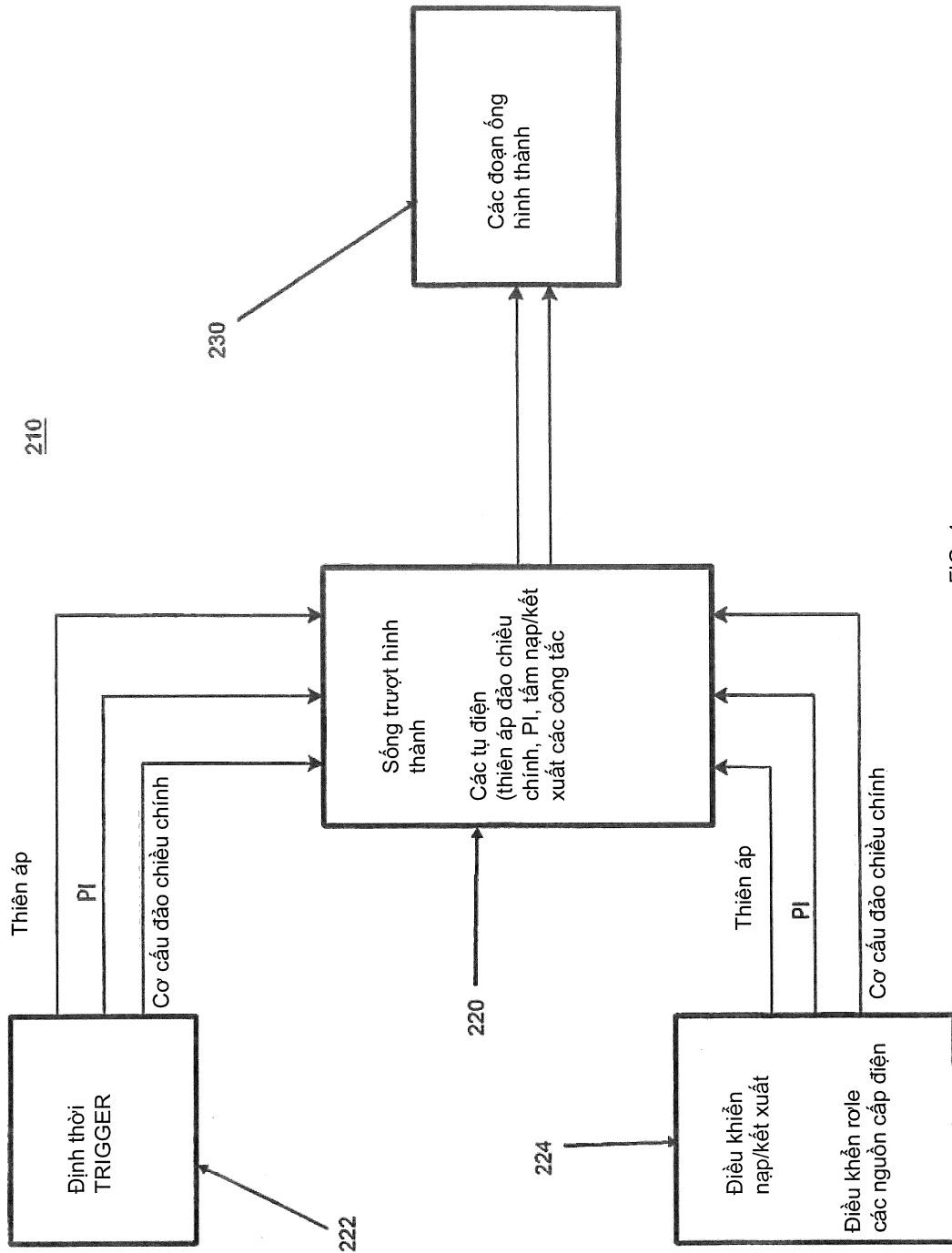


FIG. 4

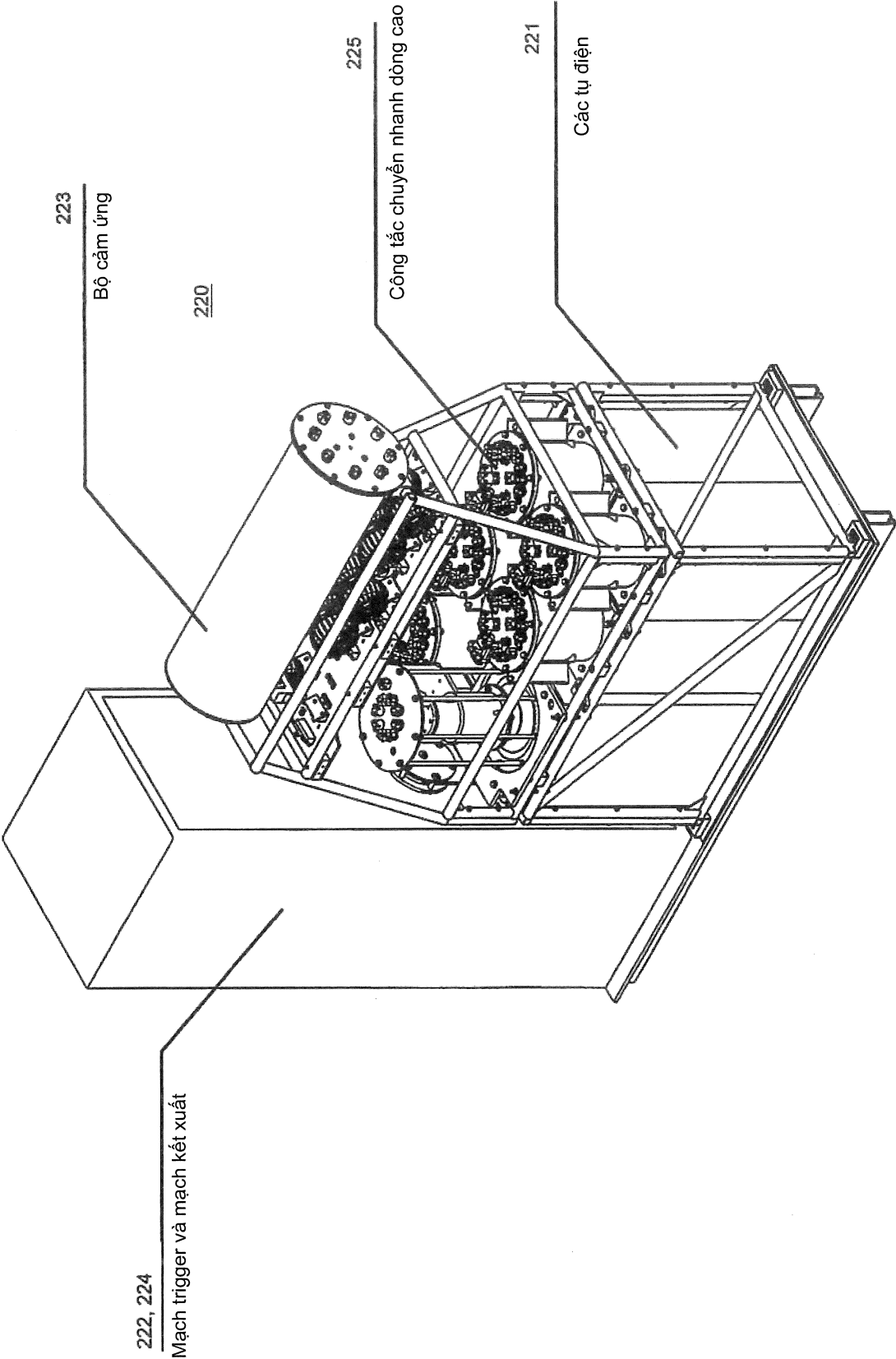


FIG. 5

9/30

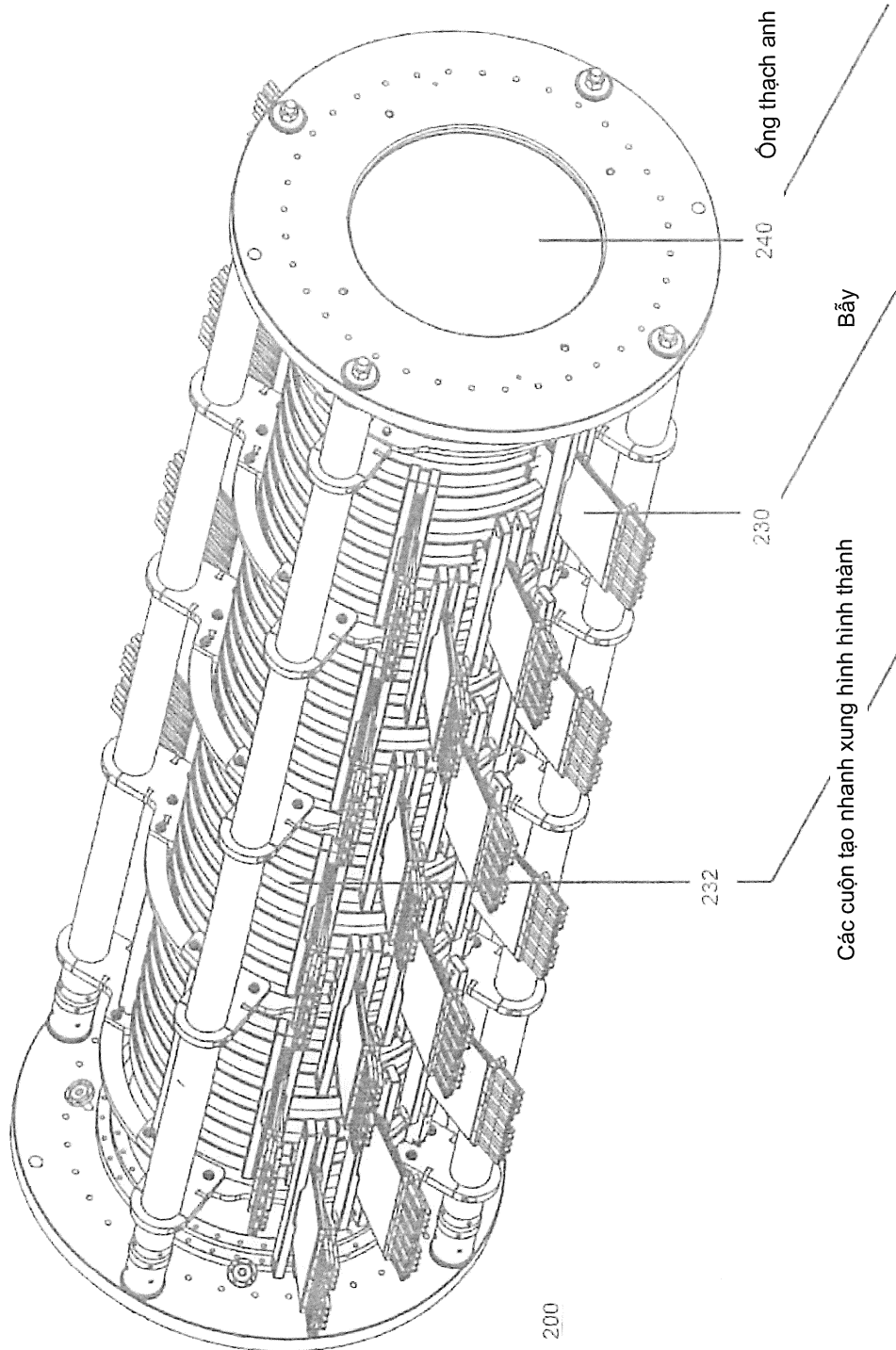


FIG. 6

10/30

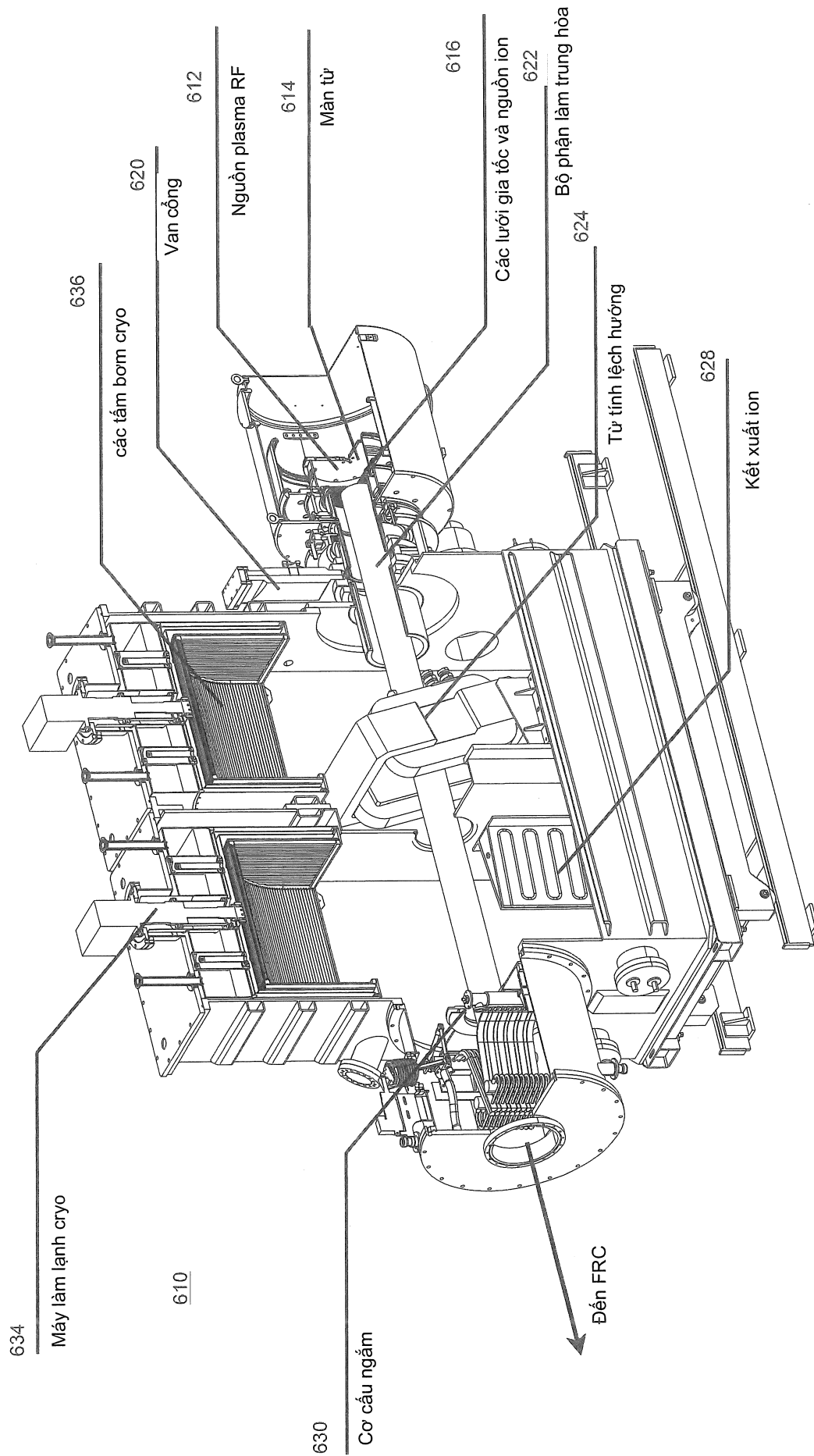


FIG. 7

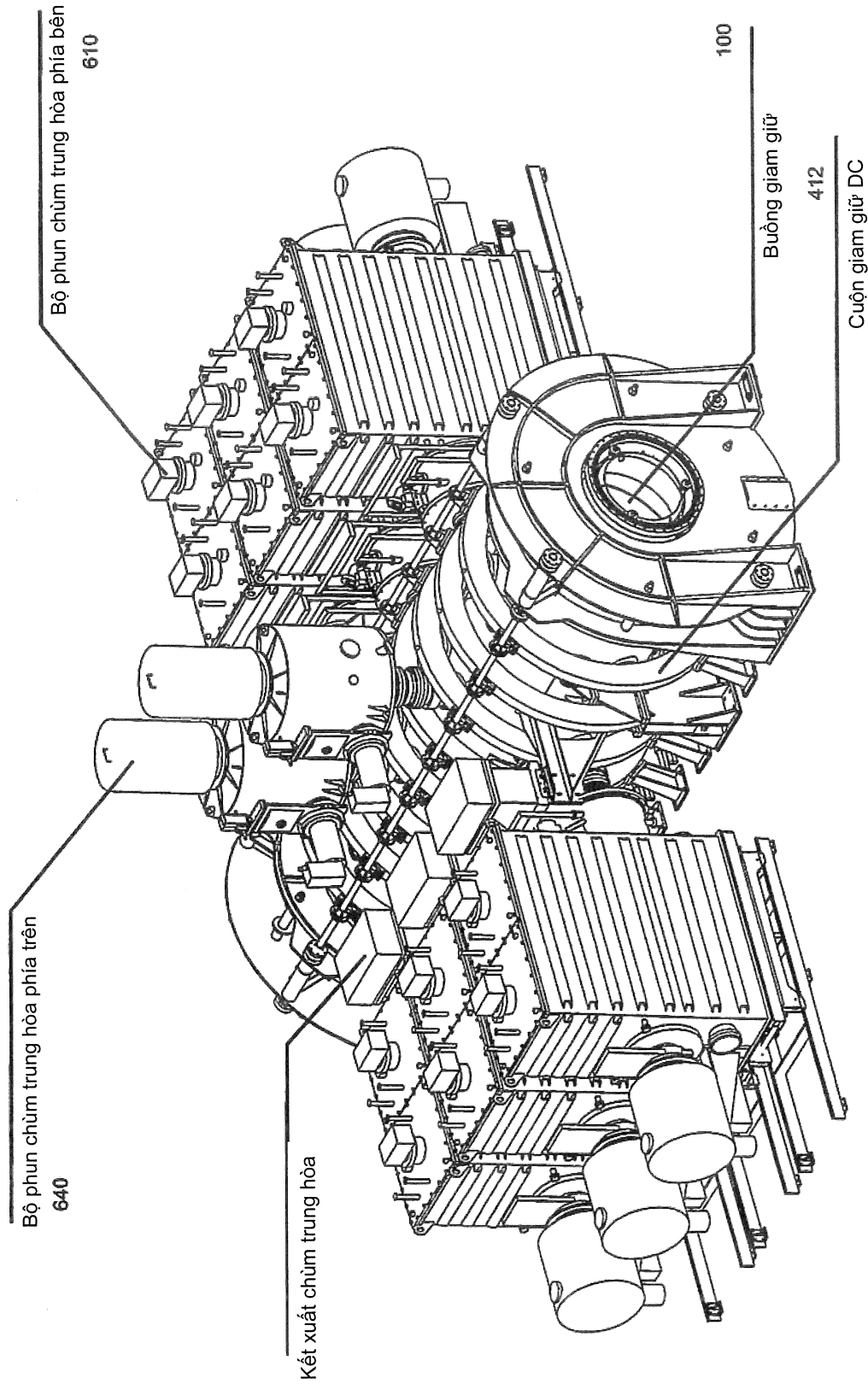


FIG.
80676-16HNPT

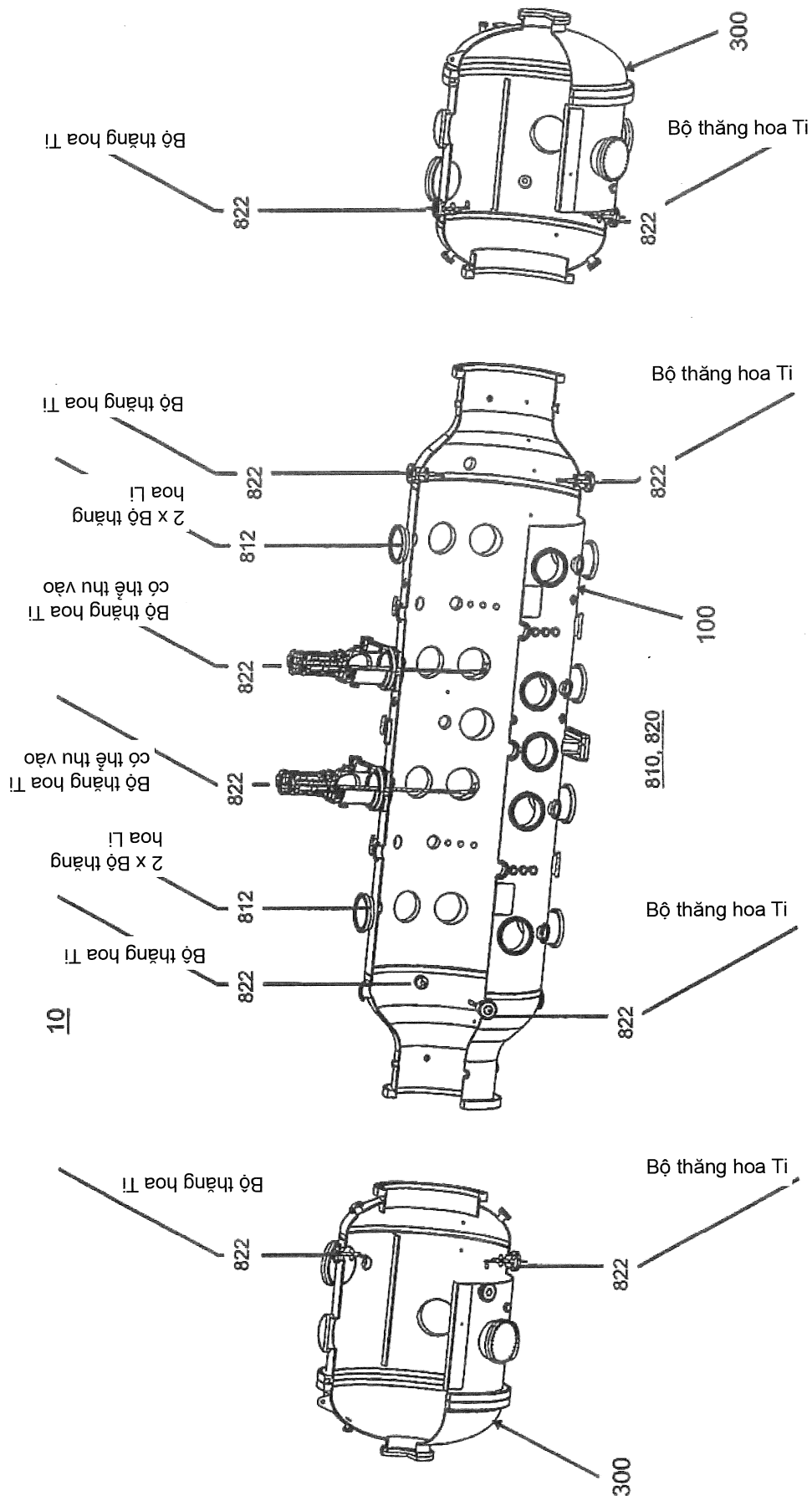


FIG. 9

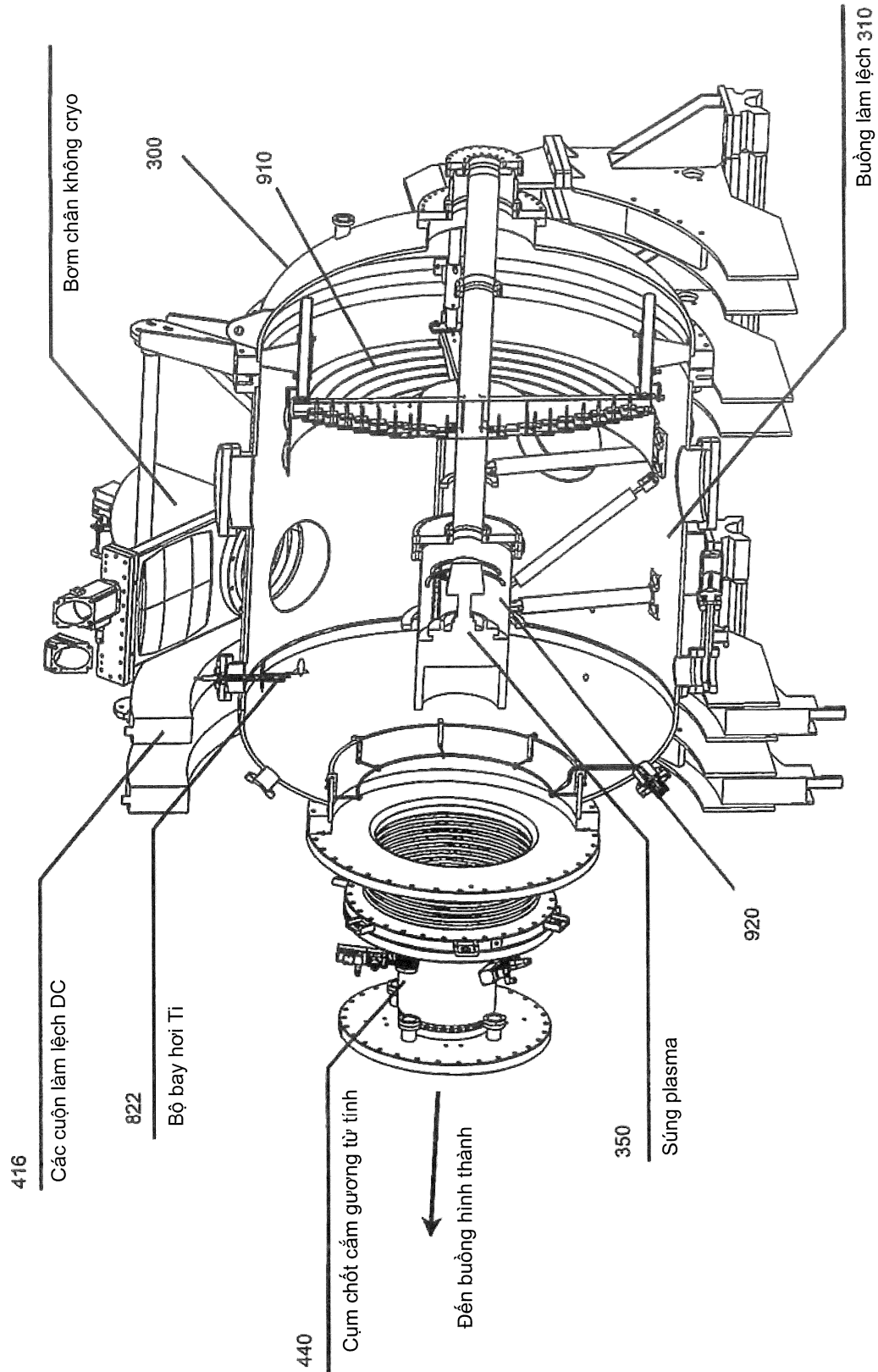


FIG. 10

14/30

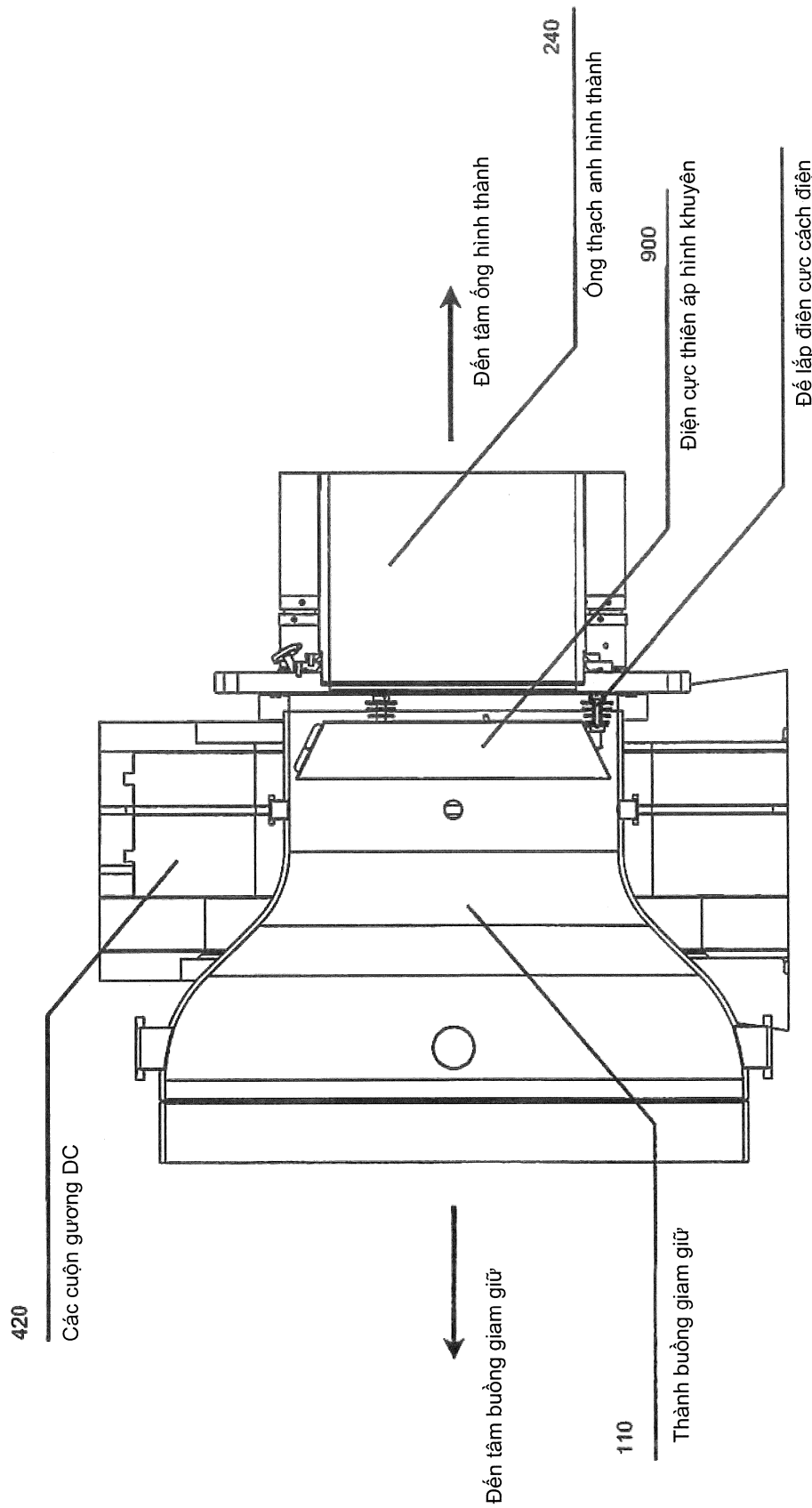


FIG. 11

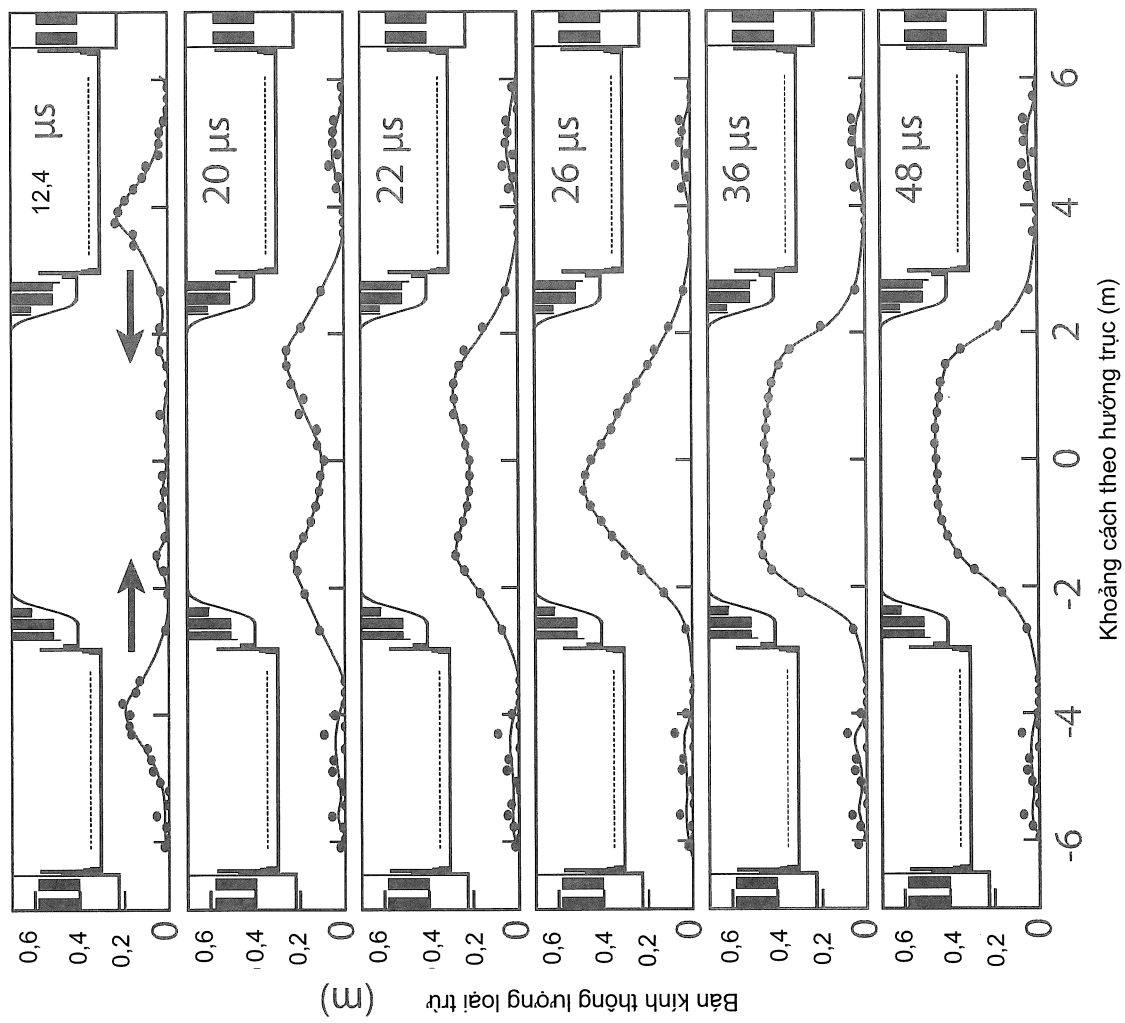


FIG. 12

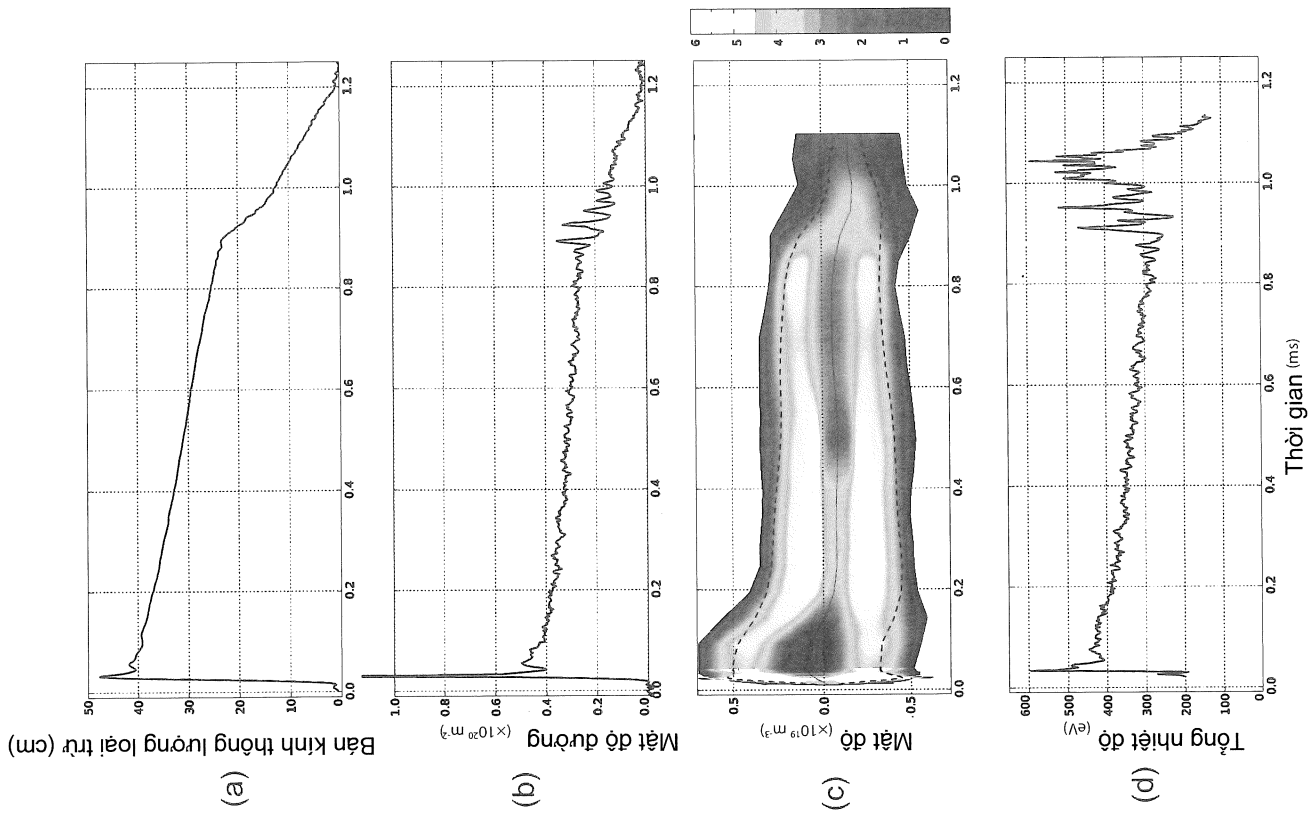


FIG. 13

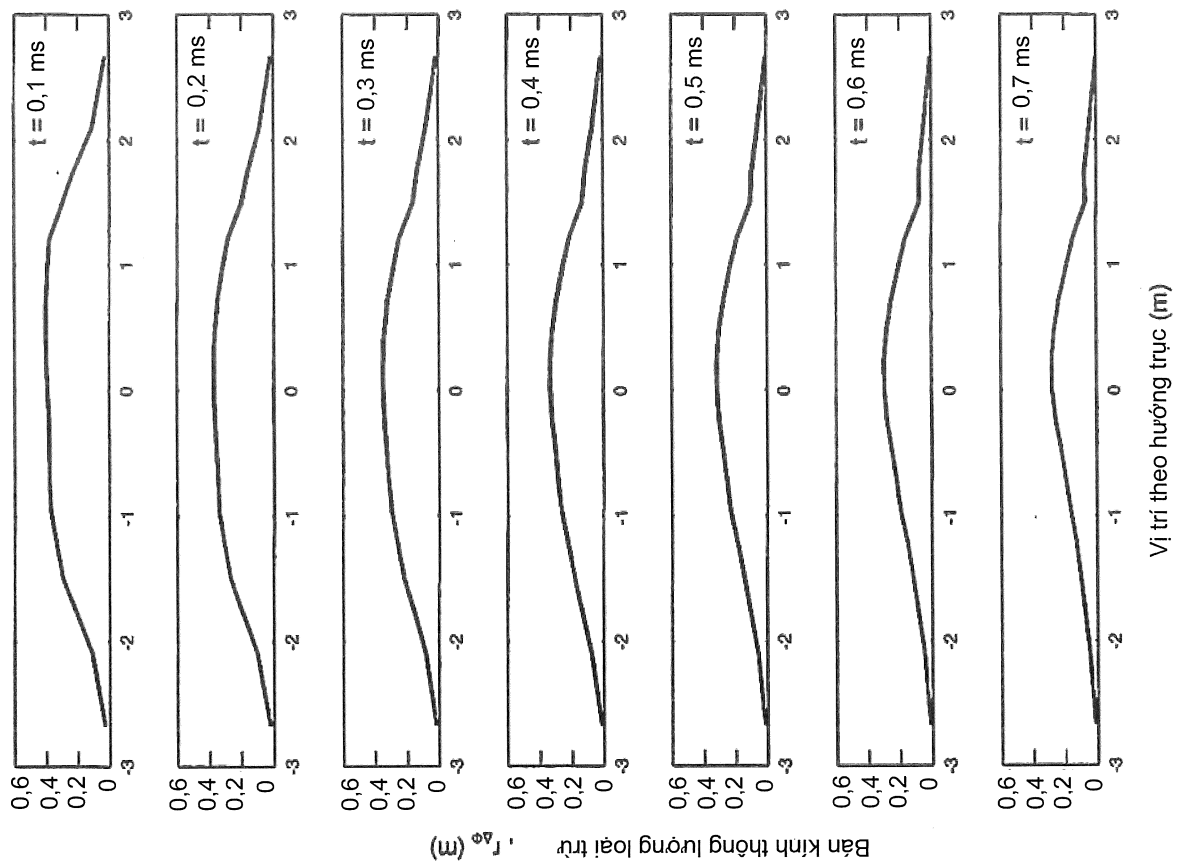


FIG. 14

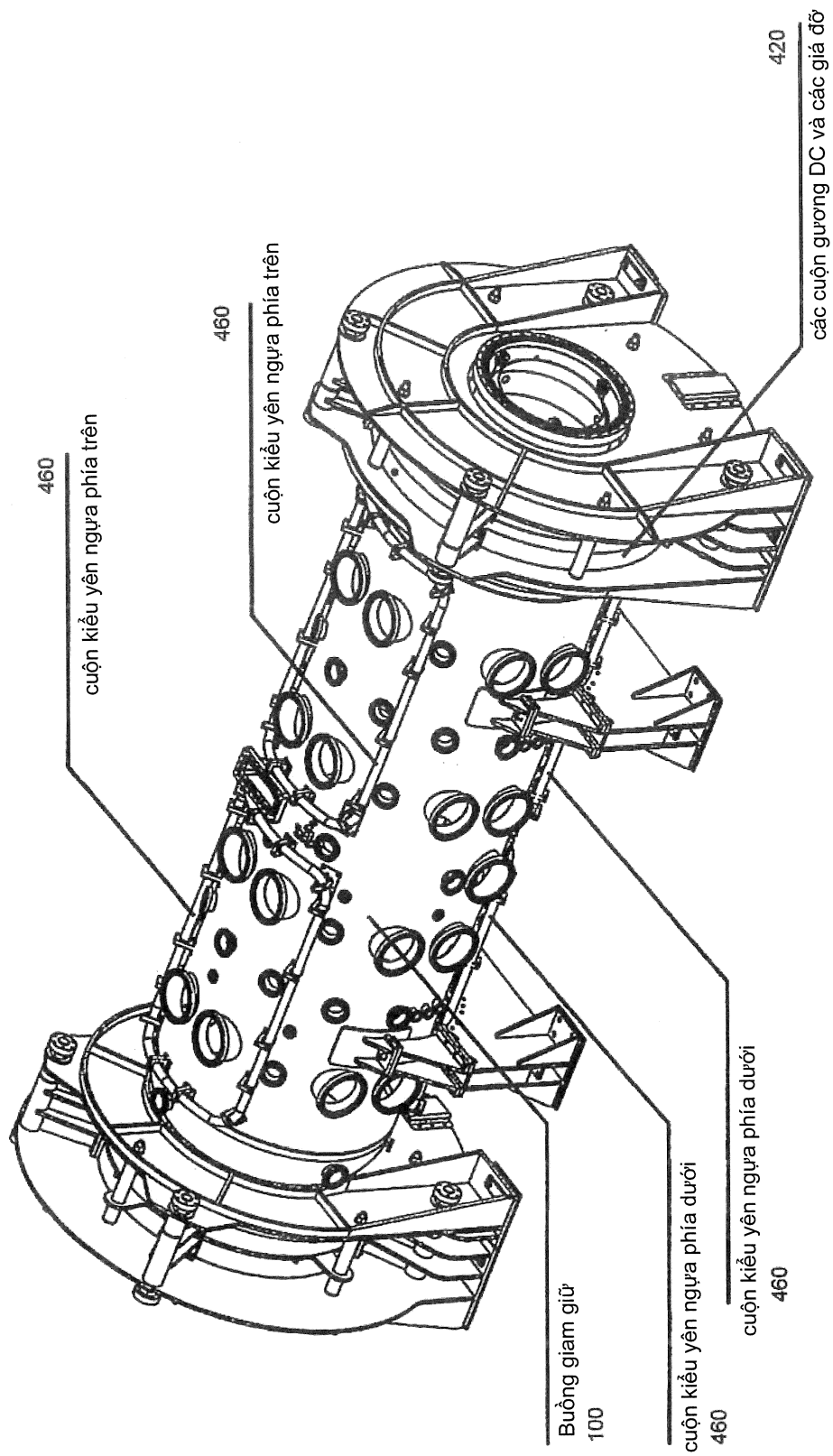


FIG. 15

19/30

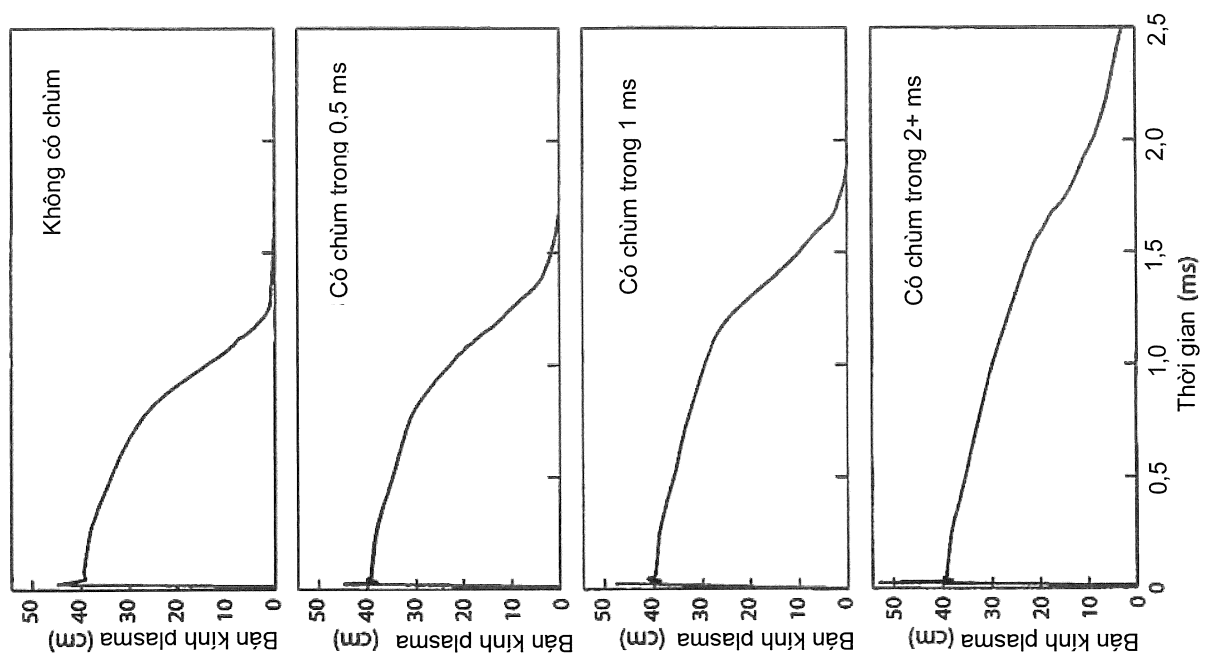


FIG. 16

20/30

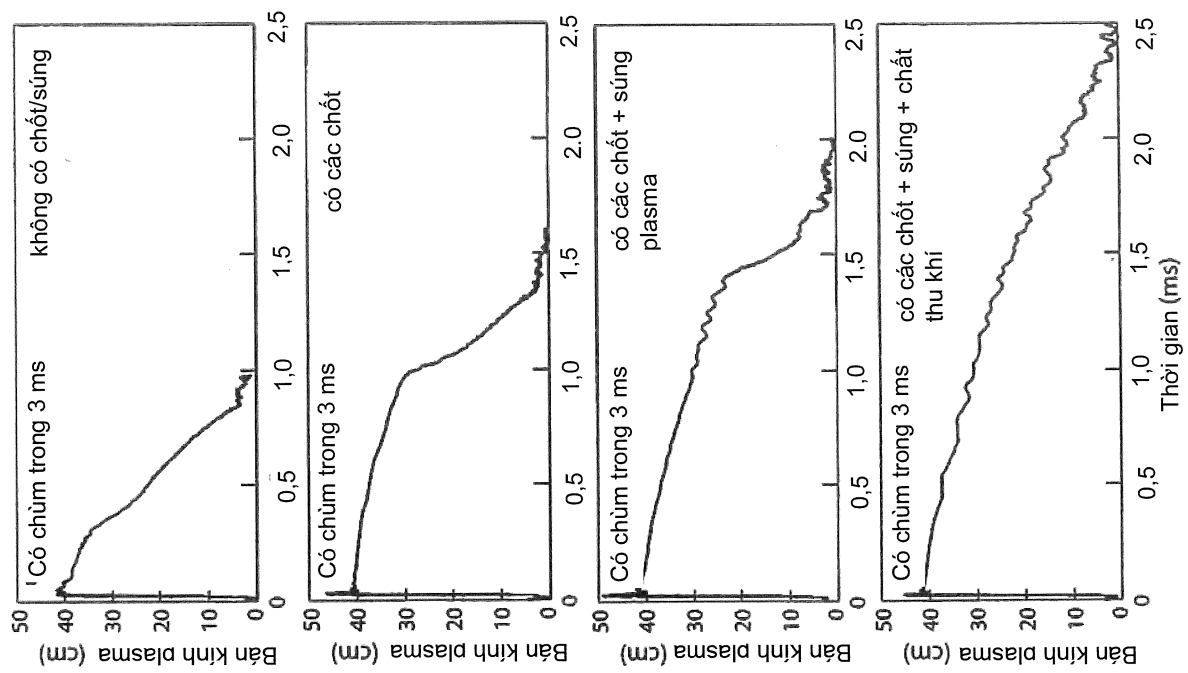


FIG. 17

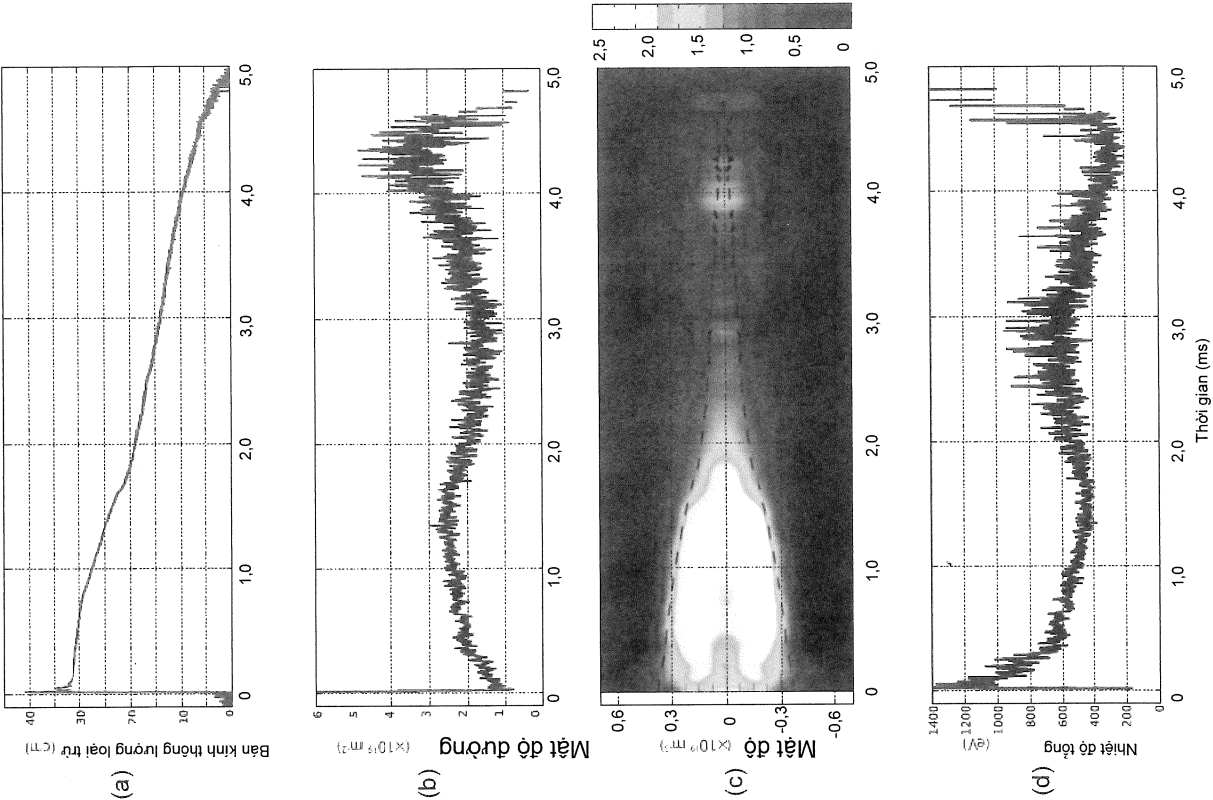


FIG. 18

22/30

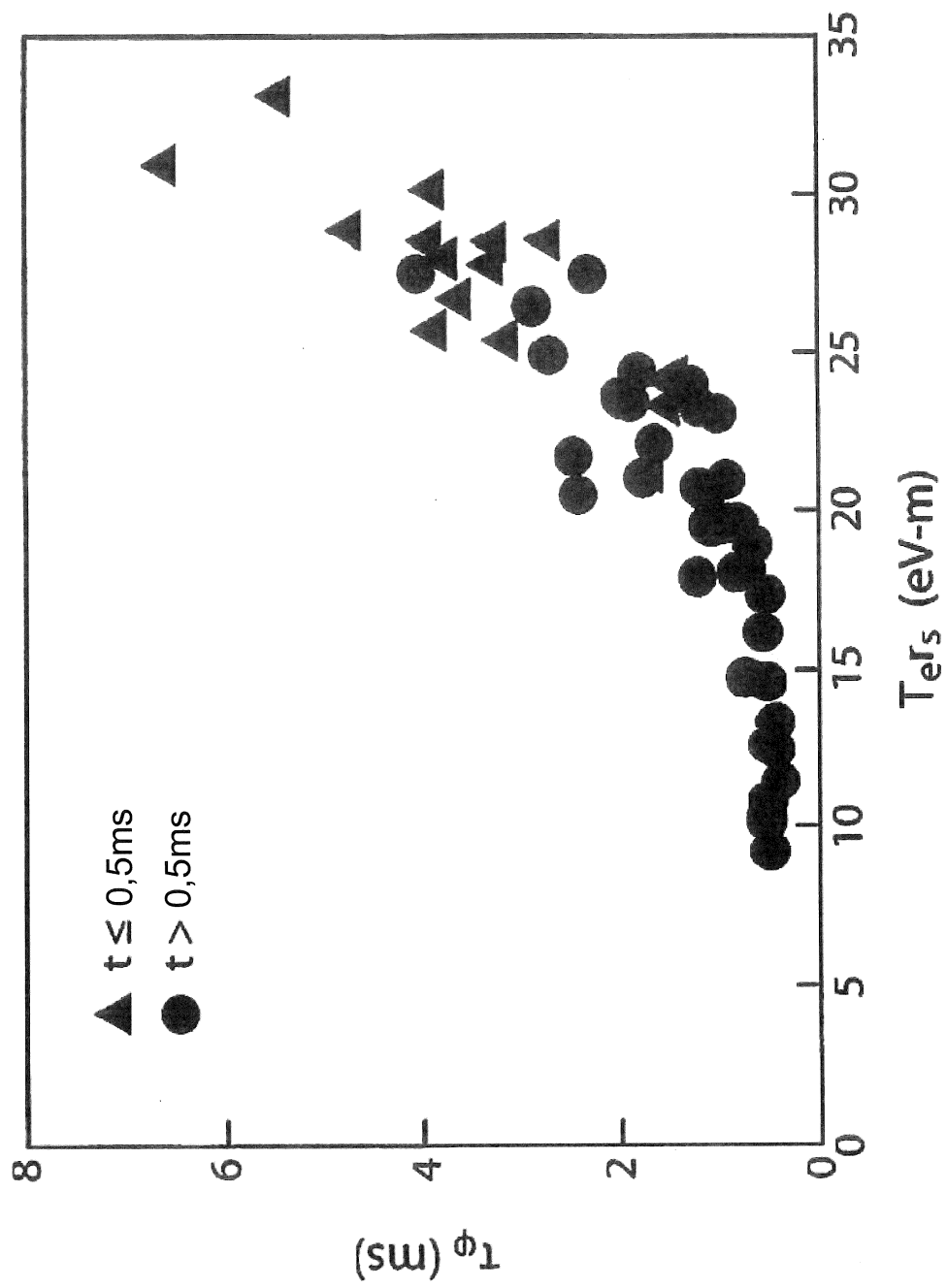


FIG. 19

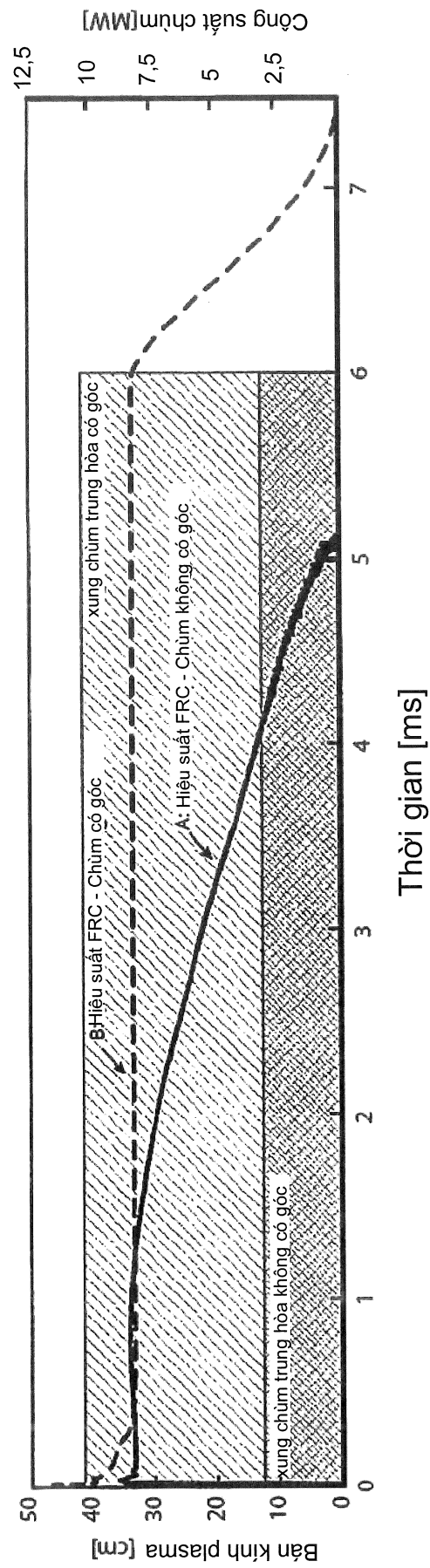


FIG. 20

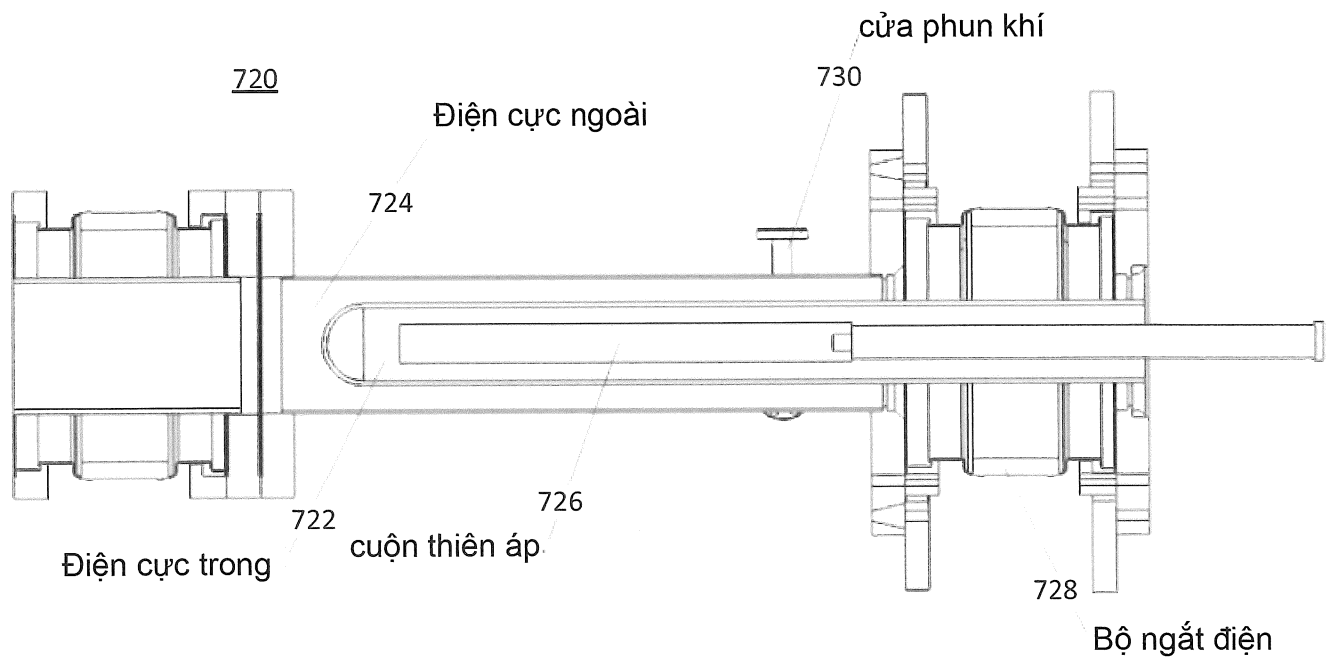


FIG. 21A

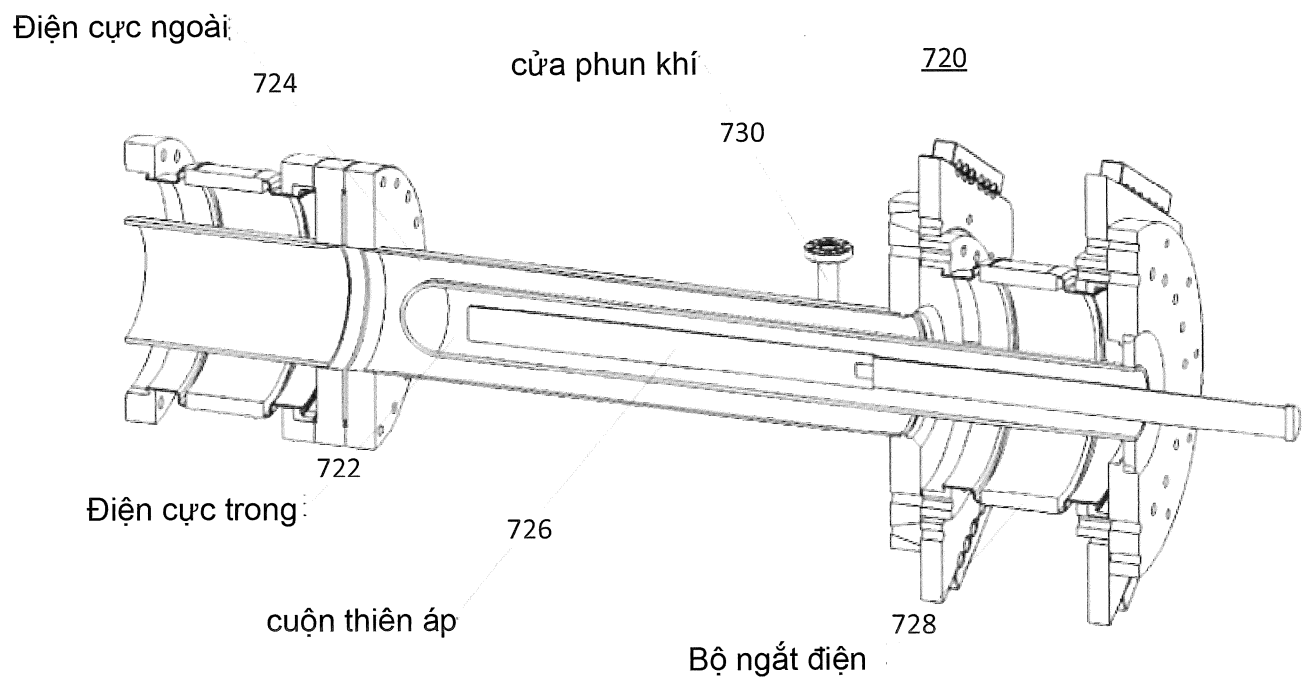


FIG. 21B

25/30

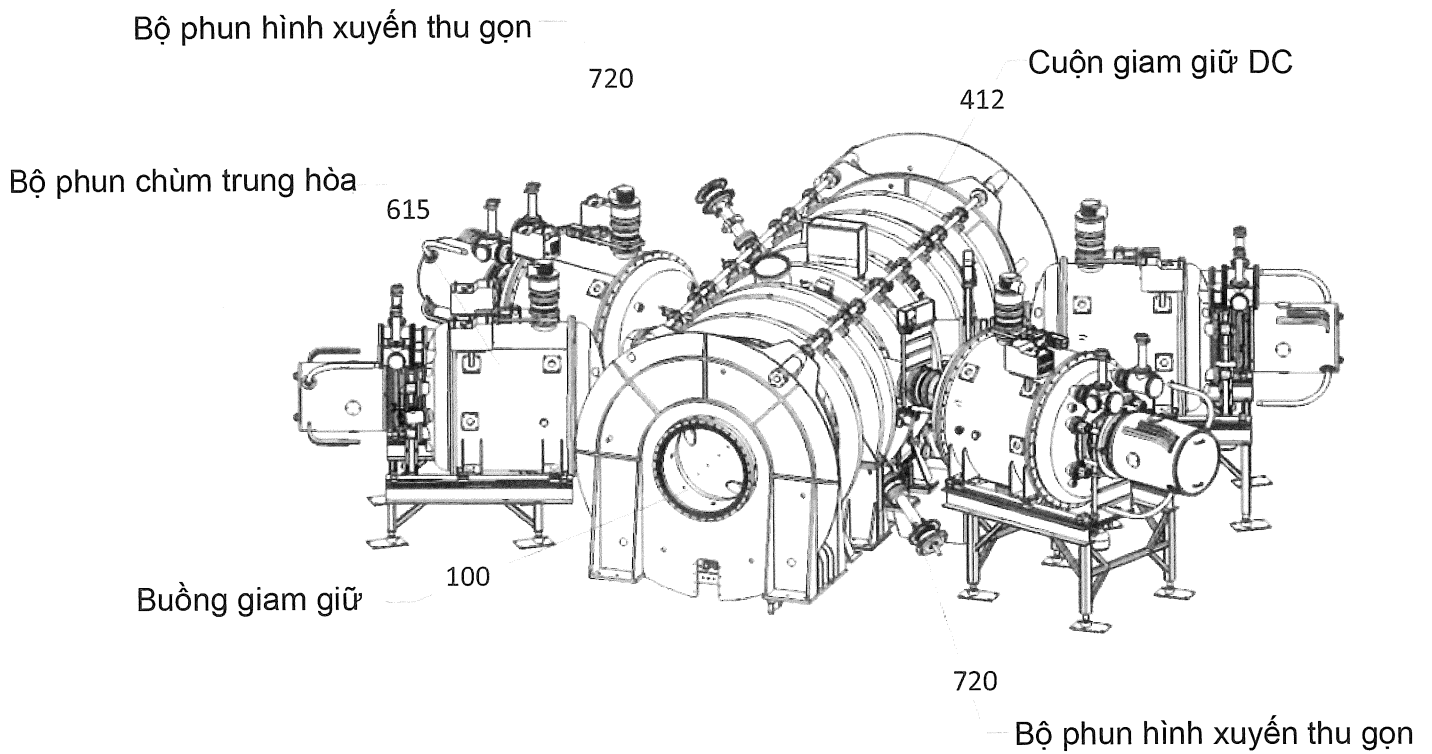


FIG. 22A

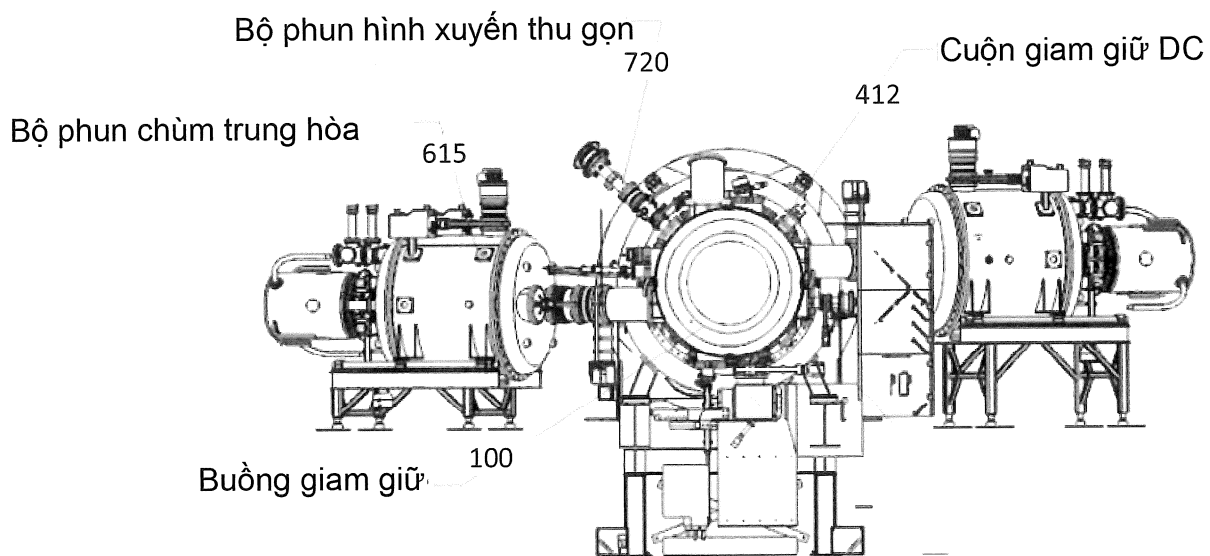


FIG. 22B

26/30

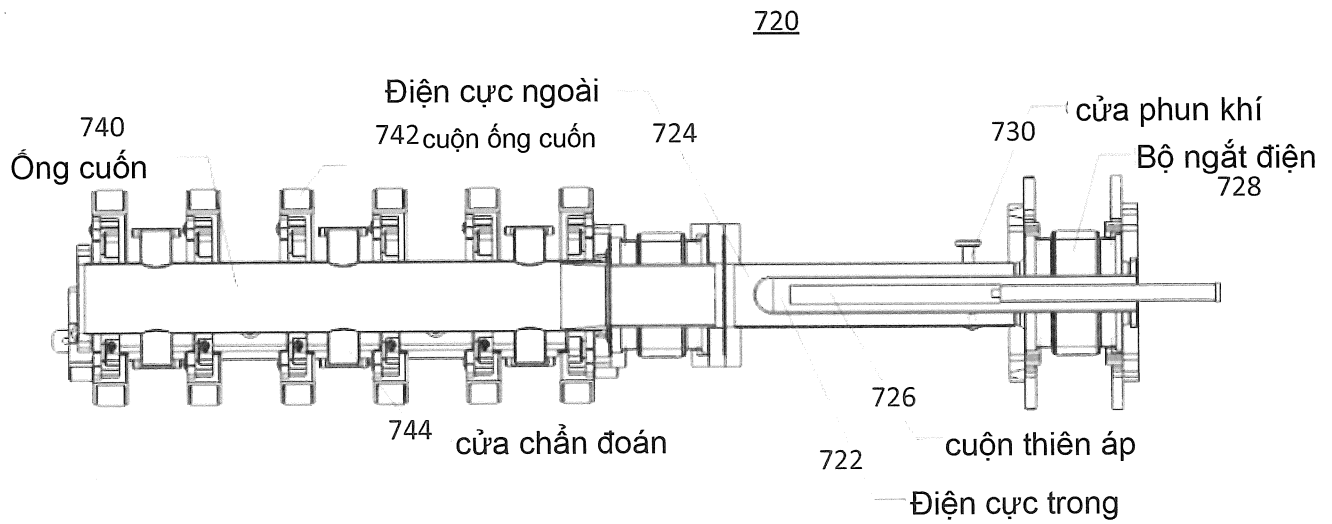


FIG. 23A

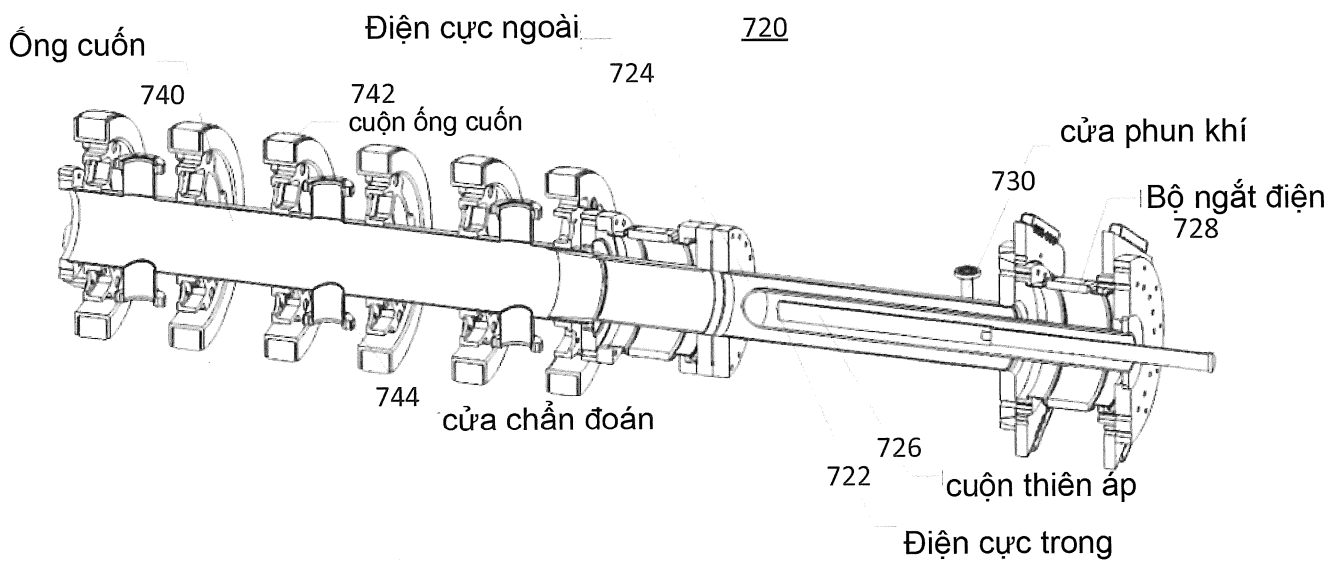


FIG. 23B

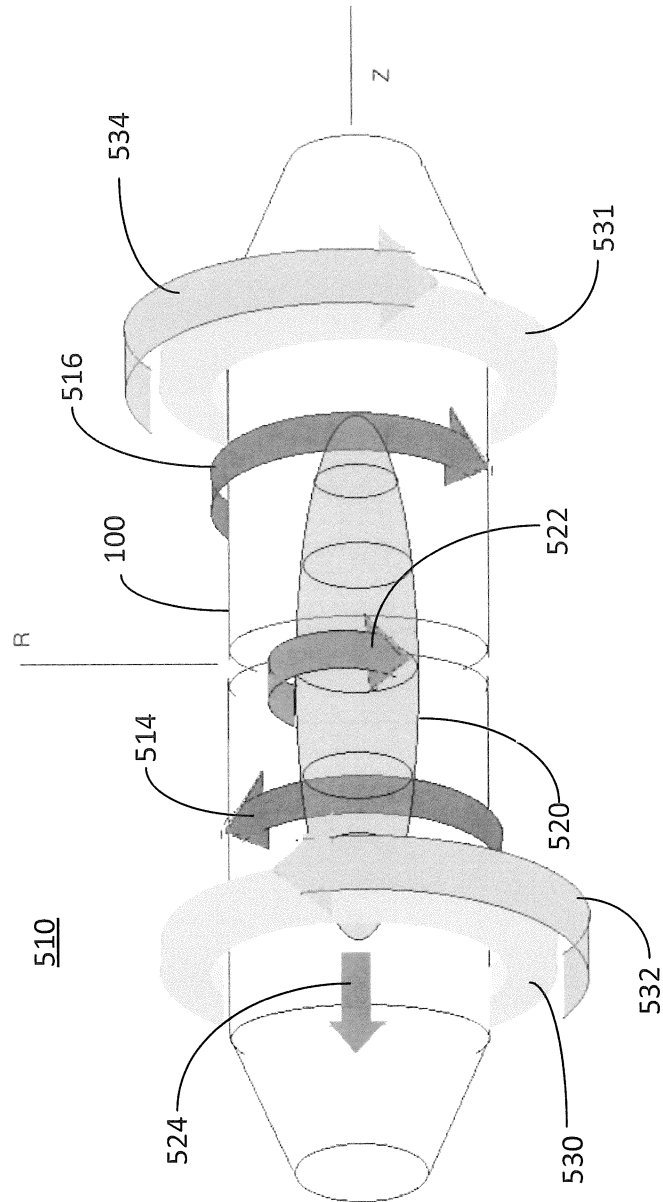


FIG. 24

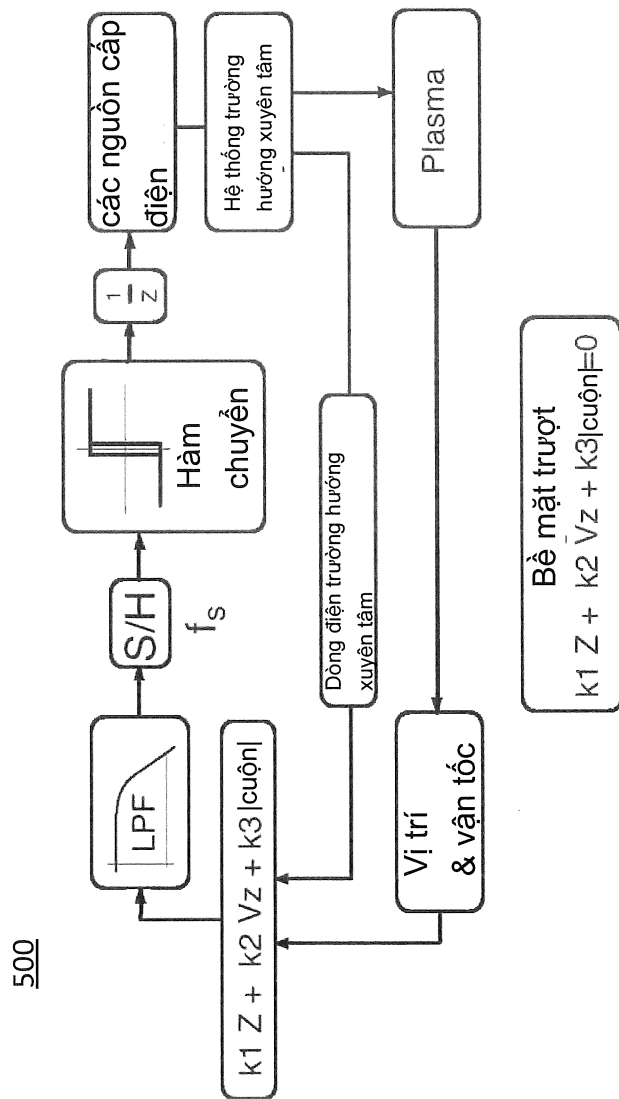


FIG. 25

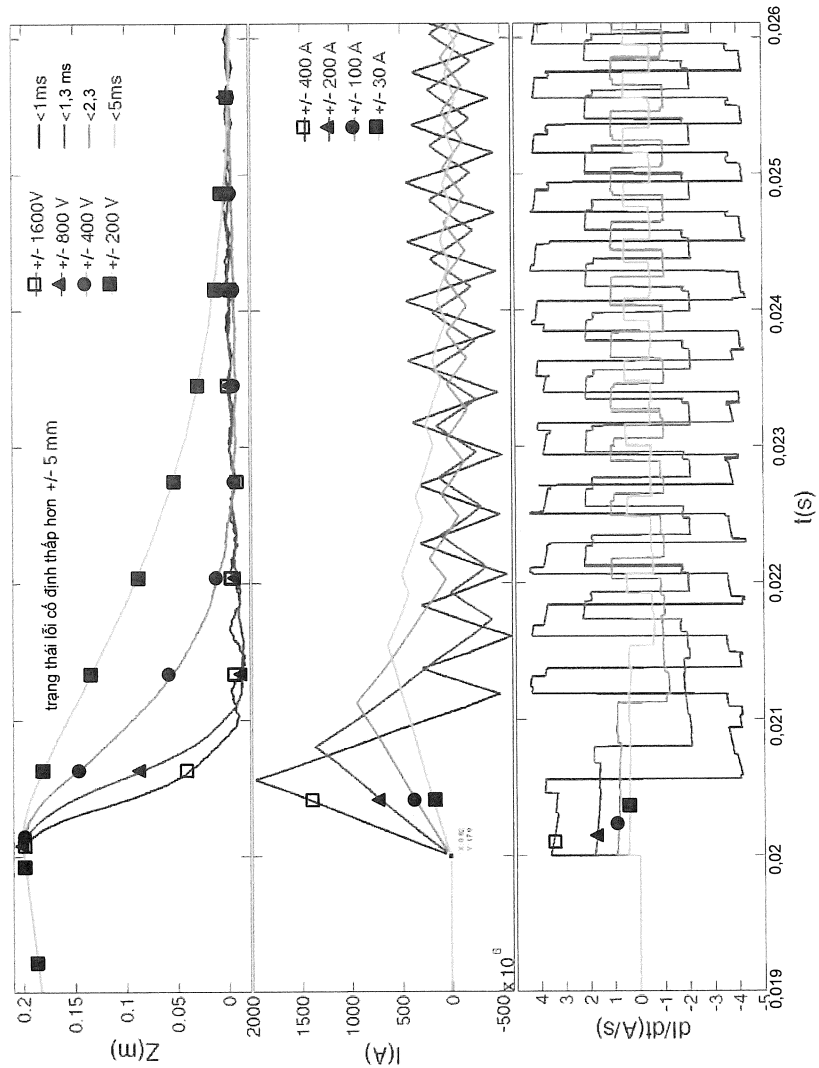


FIG. 26

30/30

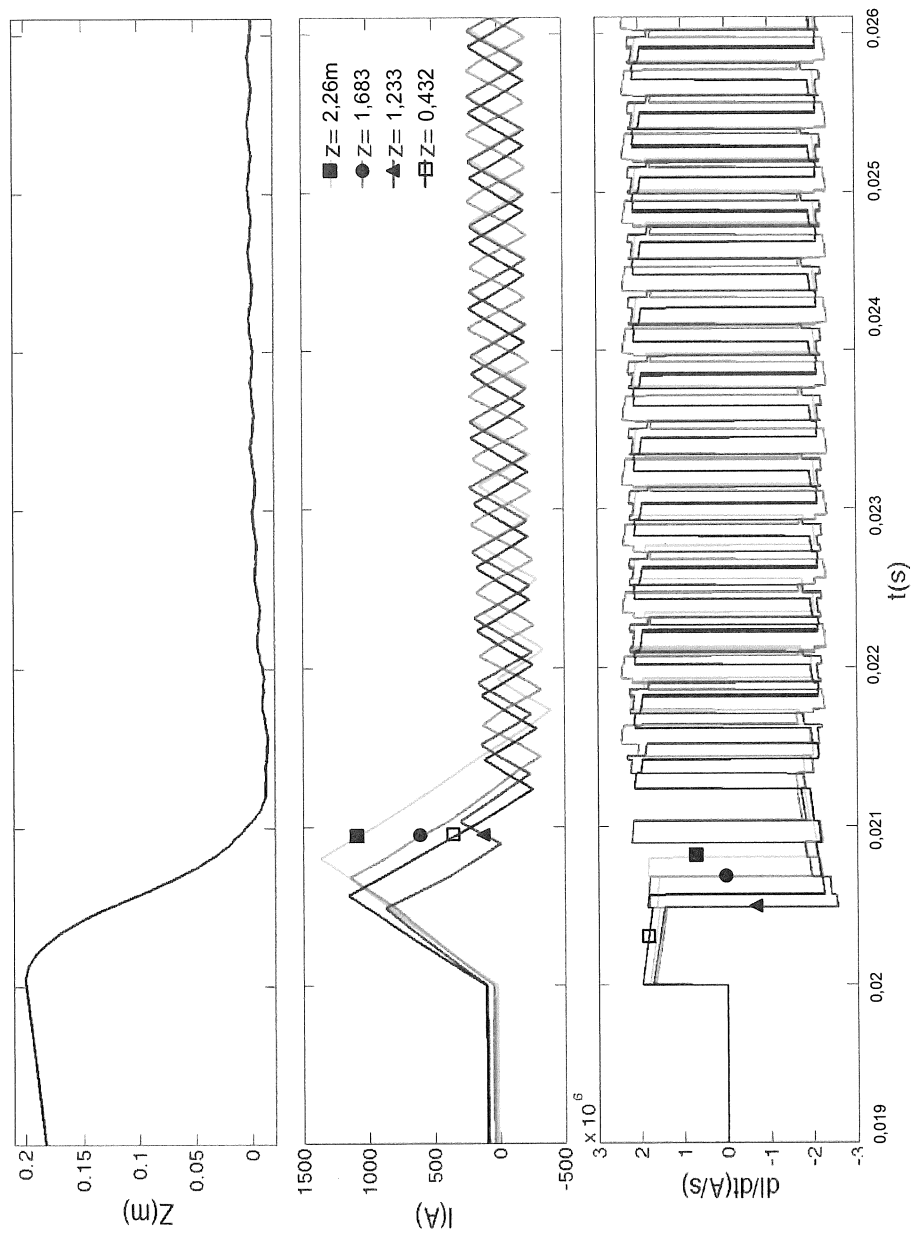


FIG. 27