

Titolo: **Metodo per formare e mantenere una FRC ad alte prestazioni**

\* \* \* \* \*

### DESCRIZIONE

5 Campo

Le forme di realizzazione qui descritte si riferiscono generalmente a sistemi di confinamento di plasma magnetico e, più in particolare, a sistemi e metodi che facilitano la formazione e il mantenimento di configurazioni a inversione di campo con stabilità superiore così come confinamento di particelle, energia e flusso.

#### Informazioni di base

La configurazione a inversione di campo (FRC) appartiene alla classe di topologie di confinamento di plasma magnetico nota come toroidi compatti (CT). Esibisce campi magnetici prevalentemente poloidali e possiede zero o piccoli campi toroidali auto-generanti (vedi M. Tuszewski, Nucl-Fusion **28**, 2033 (1988)). I punti attraenti di una tale configurazione sono la sua semplice geometria per semplicità di costruzione e mantenimento, un divertore naturale illimitato per facilitare l'estrazione di energia e la rimozione di cenere,  $\beta$  ( $\beta$  è il rapporto fra la pressione di plasma media e la pressione di campo magnetico media nella FRC) molto alti, ossia, alta densità di potenza. La natura di alto  $\beta$  è vantaggiosa per l'utilizzo economico e per l'impiego di combustibili aneutronici avanzati come D-He<sup>3</sup> e p-B<sup>11</sup>.

Il metodo tradizionale di formare una FRC utilizza la tecnologia  $\theta$ -pinch a inversione di campo, producendo caldi plasma ad

alta densità (vedi A.L. Hoffman e J.T. Slough, Nucl. Fusion **33**, 27 (1993)). Una variazione di questo è il metodo *translation-trapping* in cui il plasma creato in una "fonte" theta-pinch è più o meno immediatamente espulso da un'estremità dentro ad una camera di 5 confinamento. Il plasmoido traslante è quindi intrappolato fra due forti specchi all'estremità della camera (vedi, per esempio, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, e S. Goto, Phys. Plasmas **2**, 191 (1995)). Una volta all'interno della camera di confinamento, possono essere applicati vari metodi di riscaldamento e di conduzione di corrente come l'iniezione a 10 fascio (neutrale o neutralizzato), campi magnetici rotanti, riscaldamento RF o ohmico, etc. Questa separazione fra funzioni di fonte e funzioni di confinamento offre vantaggi chiave di ingegneria per reattori di fusione potenzialmente futuri. Le FRC si sono dimostrate estremamente robuste, resistenti alla formazione dinamica, alla traslazione, e ad eventi 15 di cattura violenta. Inoltre, mostrano una tendenza ad assumere uno stato di plasma preferito (vedi per es. H.Y. Guo, A.L. Hoffman, K.E. Miller, e L.C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. **92**, 245001 (2004)). È stato fatto progresso significativo nell'ultimo decennio sviluppando altri metodi di formazione di FRC: fondendo Spheromak con elicità a 20 direzione opposta (vedi per es. Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, e T. Okazaki, Nucl. Fusion **39**, 2001 (1999)) e conducendo la corrente con campi magnetici rotanti (RMF) (vedi per es. I.R. Jones, Phys. Plasmas **6**, 1950 (1999)) il che conferisce anche stabilità aggiuntiva.

25                   Recentemente, la tecnica *collision-merging*, proposta molto



tempo fa (vedi per es. D.R. Wells, Phys. Fluids **9**, 1010 (1966)) è stata sviluppata significativamente: due theta-pinches separati ad estremità opposte di una camera di confinamento generano simultaneamente *due* plasmoidi e accelerano i plasmoidi verso se stessi ad alta velocità; si  
5 scontrano poi al centro della camera di confinamento e si fondono per formare una FRC composta. Nella costruzione e nel successivo funzionamento di uno degli esperimenti FRC più grandi ad ora, si è dimostrato che il convenzionale metodo collision-merging produce FRC ad alta temperatura stabili, a lunga durata, ad alto flusso (vedi per es.  
10 M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski *et al.*, Phys. Rev. Lett **105**, 045003 (2010)).

Un sistema e un metodo per formare e mantenere una FRC è descritto in WO 2013/074666 A2.

Le FRC sono composte da un toro di linee di campo chiuso in  
15 una separatrice, e di uno strato a bordo anulare sulle linee di campo aperto appena fuori dalla separatrice. Lo strato a bordo si fonde in ugelli spruzzatori oltre alla lunghezza della FRC, provvedendo un divertore naturale. La topologia della FRC coincide con quella di un plasma a specchio a campo inverso. Tuttavia, una differenza  
20 significativa è che il plasma FRC ha un  $\beta$  di circa 10. Il campo magnetico interno caratteristicamente basso provvede una certa popolazione di particelle cinetiche indigene, ossia particelle con larghi raggi di larmor, paragonabili al raggio minore della FRC. Sono questi forti effetti cinetici che sembrano almeno apparentemente contribuire  
25 alla generale stabilità delle FRC passate e presenti, come quelle prodotte



nell'esperimento collision-merging.

Tipici esperimenti FRC del passato sono stati dominati da perdite convettive con il confinamento dell'energia largamente determinato dal trasporto di particelle. Le particelle si diffondono primariamente radialmente dal volume della separatrice, e sono poi perse assialmente nello strato di bordo. Di seguito, il confinamento di FRC dipende dalle proprietà di entrambe le regioni di linee di campo aperto e chiuso. Il tempo di diffusione particelle fuori dalla separatrice scala come  $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$  ( $a \sim r_s/4$ , in cui  $r_s$  è il raggio centrale della separatrice), e  $D_{\perp}$  è una caratteristica diffusività di FRC, come  $D_{\perp} \sim 12.5 \rho_{ie}$ , con  $\rho_{ie}$  rappresentante il raggio di Larmor degli ioni, valutato con un campo magnetico applicato esternamente. Il tempo di confinamento  $\tau_{\parallel}$  è essenzialmente un tempo di transito assiale in esperimenti FRC passati. Nello stato stabile, l'equilibrio fra perdite di particelle radiali ed assiali produce una lunghezza di gradiente di densità di separatrice  $\delta \sim (D_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ . Il tempo di confinamento di particelle FRC scala come  $(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$  per FRC passati che hanno densità sostanziale alla separatrice (vedi per es. M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configuration," Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988)).

Un altro svantaggio di progettazioni di sistemi FRC precedenti era la necessità di utilizzare multipolari esterni per controllare instabilità rotazionali come le rapidamente crescenti instabilità di intercambio  $n=2$ . In questo modo tipici campi quadrupoli applicati esternamente provvedevano la pressione di ripristino magnetico richiesta per smorzare la crescita di queste modalità instabili.



Nonostante questa tecnica sia adeguata per il controllo di stabilità del plasma massiccio termale, pone un problema severo per FRC più cinetiche o FRC ibride avanzate, in cui una popolazione di particelle ad orbita larga altamente cinetica è combinata con il solito plasma termale.

5 In questi sistemi, la distorsione del campo magnetico assialsimmetrico dovuta a tali campi multipolari porta a drammatiche veloci perdite di particelle per mezzo di diffusione stocastica, una conseguenza della perdita di conservazione di momento canonico angolare. Una soluzione innovativa per provvedere controllo di stabilità senza incrementare la  
10 diffusione di particelle è, perciò, importante per sfruttare il potenziale di prestazioni più alte di questi concetti avanzati di FRC mai esplorati.

In luce di ciò che precede, è, quindi, desiderabile migliorare il confinamento e la stabilità di FRC in modo da usare FRC a stato stabile come cammino verso una grande varietà di applicazioni che includono  
15 fonti di neutroni compatte (per produzione di isotopi medicinali, bonifica di scarti nucleari, ricerca sui materiali, radiografia e tomografia a neutroni), fonti di fotoni compatte (per produzione e trattamento chimico), sistemi di separazione di massa e arricchimento, e nuclei di reattore per fusione di nuclei di luce per la generazione futura di  
20 energia.

#### Sommario

Le presenti forme di realizzazione presentate qui sono orientate verso sistemi e metodi che facilitano la formazione e il mantenimento di nuove configurazioni a inversioni di campo ad alte  
25 prestazioni (FRC). Secondo questo nuovo paradigma di FRC ad alte



prestazioni, il presente sistema combina una gran quantità di idee originali e mezzi per migliorare drammaticamente il confinamento di particelle, energia e flusso delle FRC così come per provvedere controllo di stabilità senza effetti collaterali negativi.

5           Un sistema di FRC provvisto qui include un recipiente di confinamento centrale circondato da due sezioni di formazione di theta-pinch-a-inversione-di-campo diametralmente opposte e, oltre alle sezioni di formazione, due camere divertori per controllare la densità neutrale e la contaminazione da impurità. Un sistema magnetico  
10 include una serie di bobine quasi-CC che sono situate a posizioni assiali lungo i componenti del sistema FRC, bobine a specchio quasi-CC fra qualunque estremità della camera di confinamento e le adiacenti sezioni di formazione, e prese a specchio comprendenti bobine a specchio  
15 che producono aggiuntivi campi di guida per focalizzare le superfici di flusso magnetico verso il divertore. Le sezioni di formazione includono sistemi di formazione di potenza pulsati modulari i quali permettono alle FRC di essere formate in situ e poi di essere accelerate e iniettate (= formazione statica) o di essere formate e accelerate  
20 contemporaneamente (= formazione dinamica).

Il sistema FRC include iniettori di neutri per fusione e un iniettore di pellet. In una forma di realizzazione, gli iniettori di fasci sono angolati per iniettare particelle neutre verso il piano mediano. Aver angolato gli iniettori di fasci verso il piano mediano e con le posizioni di  
25 fasci assiali vicine al piano mediano migliora l'accoppiamento fascio-



plasma, anche quando il plasma della FRC si riduce o si ritrae assialmente durante il periodo di iniezione. Sistemi getter sono altrettanto inclusi così come pistole al plasma assiale. Sono provvisti inoltre elettrodi polarizzanti per la polarizzazione elettrica di superfici di  
5 flusso aperto.

In funzione, i parametri di plasma della FRC globali includendo energia termica di plasma, numeri totali di particelle, raggio e lunghezza di plasma, così come flusso magnetico, sono sostanzialmente sostenibili senza decadenza mentre fasci neutri  
10 vengono iniettati nel plasma e i pellet forniscono un rifornimento di particelle appropriato.

I sistemi, i metodi, le caratteristiche e i vantaggi dell'invenzione saranno o diventeranno evidenti a chi è esperto del settore in seguito all'ispezione delle seguenti figure e della descrizione  
15 dettagliata. Si intende che tutti questi metodi, queste caratteristiche e questi vantaggi aggiuntivi sono inclusi in questa descrizione, sono compresi nell'ambito dell'invenzione, e sono protetti dalle rivendicazioni accompagnanti.

Breve descrizione delle figure

20 I disegni allegati, che sono inclusi come parte della presente specificazione, illustrano la forma di realizzazione preferita al momento e, assieme alla generale descrizione fornita sopra e la descrizione dettagliata della forma di realizzazione preferita fornita sotto, servono a spiegare ed insegnare i principi della seguente invenzione.

25 **Figura 1** illustra confinamento di particelle nel presente



sistema FRC sotto un regime di alte prestazioni di FRC (HPF) rispetto a un regime convenzionale di FRC (CR), e rispetto ad altri esperimenti di convenzionali FRC.

**Figura 2** illustra i componenti del presente sistema di FRC e la topologia magnetica di una FRC producibile nel presente sistema di FRC.

**Figura 3A** illustra la struttura basilare del presente sistema di FRC come visto dall'alto, includendo la disposizione preferita di fasci neutri, elettrodi, pistole al plasma, prese a specchio, e iniettore di pellet.

**Figura 3B** illustra il recipiente centrale di confinamento come si vede dall'alto e mostrando i fasci neutri disposti in corrispondenza di un angolo normale rispetto all'asse maggiore di simmetria nel recipiente centrale di confinamento.

**Figura 3C** illustra il recipiente centrale di confinamento come si vede dall'alto e mostrando i fasci neutri disposti in corrispondenza di un angolo inferiore alla normale rispetto all'asse di simmetria maggiore nel recipiente centrale di confinamento e diretti per iniettare particelle verso il piano mediano del recipiente centrale di confinamento.

**Figura 4** illustra uno schema dei componenti di un sistema di potenza pulsata per le sezioni di formazione.

**Figura 5** illustra una vista isometrica di un pattino di formazione di potenza pulsata individuale.

**Figura 6** illustra una vista isometrica di un insieme di tubo di formazione.

**Figura 7** illustra una vista isometrica in sezione parziale del



sistema di fasci neutri e dei componenti chiave.

**Figura 8** illustra una vista isometrica della disposizione di fasci neutri sulla camera di confinamento.

**Figura 9** illustra una vista isometrica in sezione parziale di una disposizione preferita dei sistemi getter Ti e Li.

**Figura 10** illustra una vista isometrica in sezione parziale di una pistola al plasma installata nella camera divertore. Sono mostrati inoltre la presa a specchio associata e un insieme di elettrodi divertore.

**Figura 11** illustra una struttura preferita di un elettrodo polarizzato anulare all'estremità assiale della camera di confinamento.

**Figura 12** illustra l'evoluzione del raggio di flusso escluso nel sistema FRC ottenuto da una serie di circuiti diamagnetici esterni alle due sezioni di formazione di theta pinch a inversione e sonde magnetiche incorporate nella camera di confinamento metallica centrale. Il tempo è misurato a partire dall'istante di inversione di campo sincronizzata nelle fonti di formazione, e la distanza  $z$  è fornita in relazione al piano mediano assiale della macchina.

**Figure 13 (a) fino a (d)** illustrano dati di uno scarico rappresentativo non-HPF, non sostenuto sul presente sistema di FRC. Mostrati come funzioni di tempo sono (a) raggio di flusso escluso a piano mediano, (b) 6 fili di densità a linea integrata dall'interferometro CO<sub>2</sub> del piano mediano (c) profili radiali di densità a inversione Abel dai dati del interferometro CO<sub>2</sub>, e (d) temperatura di plasma totale dai bilanci di pressione.

**Figura 14** illustra i profili assiali di flusso escluso in momenti



selezionati per lo stesso scarico del presente sistema di FRC mostrato in Figura 13.

**Figura 15** illustra una vista isometrica delle bobine di sella montate all'esterno della camera di confinamento.

5 **Figura 16** illustra le correlazioni fra durata di vita di FRC e lunghezza di pulsazione di fasci neutri iniettati. Come mostrato, pulsazioni di fasci più lunghe producono FRC di durata più lunga.

**Figura 17** illustra gli effetti individuali e combinati di diversi componenti del sistema FRC sulle prestazioni FRC e il raggiungimento  
10 del regime HPF.

**Figure 18(a) fino a (d)** illustrano dati di uno scarico rappresentativo HPF, non sostenuto sul presente sistema FRC. Mostrate come funzioni di tempo sono (a) raggio di flusso escluso a piano  
15 mediano, (b) 6 fili di densità a linea integrata dall'interferometro CO<sub>2</sub> del piano mediano (c) profili radiali di densità a inversione Abel dai dati del interferometro CO<sub>2</sub>, e (d) temperatura di plasma totale dai bilanci di pressione.

**Figura 19** illustra confinamento di flusso come una funzione di temperatura di elettrone ( $T_e$ ). Rappresenta una rappresentazione  
20 grafica di un regime di scala superiore neo stabilito per scarichi HPF.

**Figura 20** illustra il ciclo di vita della FRC corrispondente alla lunghezza dell'impulso di fasci neutri iniettati non-angolati e angolati.

Andrebbe notato che le figure non sono necessariamente disegnate in scala e che gli elementi di strutture o funzioni simili sono  
25 generalmente rappresentati da numeri di riferimento simili per motivi di



illustrazione nelle figure. Andrebbe inoltre notato che le figure sono soltanto pensate per facilitare la descrizione delle varie forme di realizzazione descritte qui. Le figure non descrivono necessariamente ogni aspetto degli insegnamenti spiegati qui e non limitano l'ambito  
5 delle rivendicazioni.

Descrizione dettagliata

Le presenti forme di realizzazione provviste qui sono incentrate su sistemi e metodi che facilitano la formazione e il mantenimento di configurazioni a inversione di campo ad alte  
10 prestazioni (FRC) con stabilità superiore così come con confinamento di particella, energia, flusso superiori a FRC convenzionali. Tali FRC ad alte prestazioni prevedono un cammino verso un'ampia varietà di applicazioni che includono fonti di neutroni compatte (per produzione di isotopi medicinali, bonifica di scarti nucleari, ricerca sui materiali,  
15 radiografia e tomografia a neutroni), fonti di fotoni compatte (per produzione e trattamento chimico), sistemi di separazione di massa e arricchimento, e nuclei di reattore per fusione di nuclei di luce per la generazione futura di energia.

Sono stati esplorati vari sistemi ancillari e modalità operative  
20 per assestare la presenza di regimi di confinamento superiori in FRC. Questi sforzi hanno portato a scoperte di svolta e allo sviluppo del paradigma di FRC ad alte prestazioni descritto qui. Secondo questo nuovo paradigma il presente sistema e i metodi combinano una grande quantità di idee e mezzi originali per migliorare drammaticamente il  
25 confinamento di FRC così come illustrato nella Figura 1 così come



provvedere a controllo di stabilità senza effetti collaterali negativi. Come discusso in grande dettaglio sotto, la Figura 1 mostra il confinamento di particelle in un sistema di FRC 10 descritto sotto (vedi Figure 2 e 3), funzionante secondo un regime di alte prestazioni FRC (HPF) per formare e mantenere una FRC contro il confinamento di particelle secondo un regime convenzionale CR per formare e mantenere una FRC, e contro il confinamento di particelle secondo regimi convenzionali per formare e mantenere una FRC utilizzati in altri esperimenti. La presente descrizione schematizzerà e specificherà gli innovativi componenti individuali del sistema FRC 10 e dei metodi così come i loro effetti collettivi.

#### Descrizione del sistema FRC

##### *Vacuum system*

[036] Le figure 2 e 3 mostrano uno schema del presente sistema di FRC 10. Il sistema di FRC 10 include un recipiente di confinamento centrale 100 circondato da due sezioni di formazione di theta-pinch-a-inversione-di-campo diametralmente opposte e, oltre alle sezioni di formazione 200, due camere divortore 300 per controllare la densità neutrale e la contaminazione di impurità. Il presente sistema di FRC 10 è stato costruito per accomodare un vuoto ultra-alto e opera a tipiche pressioni base di  $10^{-8}$  torr. Tale pressioni di vuoto richiedono l'utilizzo di flange di accoppiamento a doppio pompaggio fra i componenti di accoppiamento, anelli ad O metallici, pareti interne ad alta purezza, così come un attento condizionamento di superficie iniziale di tutte le parti prima dell'assemblaggio, così come pulizia fisica



e chimica seguita da una cottura sotto vuoto a 250°C per 24 ore e pulizia con scarico di bagliori di idrogeno.

Le sezioni di formazione di theta-pinch-a-inversione-di-campo 200 sono theta-pinch-a-inversione-di-campo (FRTP) standard, sebbene con un sistema di formazione di potenza pulsata avanzato discusso in dettaglio di sotto (vedi Figure da 4 a 6). Ogni sezione di formazione 200 è fatta di tubi di quarzo di tipo industriale opachi che presentano un rivestimento interno di 2 millimetri di quarzo ultrapuro. La camera di confinamento 100 è fatta di acciaio inossidabile per permettere una moltitudine di porte radiali e tangenziali; serve anche come conservatore di flusso sul lasso di tempo degli esperimenti descritti di sotto e limita passaggi magnetici veloci. È creato e mantenuto il vuoto all'interno del sistema FRC 10 con una serie di pompe di sgrossatura a scorrimento a secco, pompe molecolari turbo e pompe di criolo.

15            *Sistema magnetico*

Il sistema magnetico 400 è illustrato nelle Figura 2 e 3. La Figura 2, fra altre caratteristiche, illustra un flusso magnetico FRC e contorni di densità (come funzioni delle coordinate radiali e assiali) riguardanti un FRC 450 producibile dal sistema FRC 10. Questi contorni sono stati ottenuti da una simulazione numerica resistiva Hall-MHD 2-D utilizzando codici sviluppati per simulare sistemi e metodi corrispondenti al sistema FRC 10, e si accordano bene con dati sperimentali misurati. Come mostrati nella Figura 2, la FRC 450 consiste in un toro di linee di campo chiuso all'interno 453 della FRC 450 in una separatrice 451, e di uno strato di bordo anulare 456 sulle



linee di campo aperto 452 appena fuori dalla separatrice 451. Lo strato di bordo 456 si fonde in ugelli spruzzatori 454 oltre alla lunghezza di FRC, provvedendo un divertore naturale.

Il sistema magnetico principale 410 include una serie di bobine quasi-CC 412, 414, e 416 che sono situate a particolari posizioni assiali lungo le componenti, ossia lungo la camera di confinamento 100, le sezioni di formazione 200 e i divertori 300, del sistema FRC 10. Le bobine quasi-CC 412, 414 e 416 sono alimentate da alimentatori commutanti quasi-CC e producono campi magnetici polarizzati basici di circa 0.1 T nella camera di confinamento 100, le sezioni di formazione 200 e i divertori 300. In aggiunta alle bobine quasi-CC 412, 414 e 416, il sistema magnetico principale 410 include bobine a specchio quasi-CC 420 (alimentate da mezzi di commutazione) fra qualsiasi estremità della camera di confinamento 100 e le sezioni di formazione adiacenti 200. Le bobine a specchio quasi-CC 420 provvedono rapporti di specchio magnetico fino a 5 e possono essere energizzate indipendentemente per il controllo di formazione di equilibrio. In aggiunta, le prese a specchio 440, sono posizionate fra ognuna delle sezioni di formazione 200 e i divertori 300. Le prese a specchio 440 comprendono bobine a specchio quasi-CC compatte e bobine di prese a specchio 444. Le bobine a specchio quasi-CC 430 includono tre bobine 432, 434 e 436 (alimentate da mezzi di commutazione) che producono campi di guida aggiuntivi per orientare le superfici di flusso magnetico 455 verso il passaggio di piccolo diametro 442 passando attraverso le bobine di prese a specchio 444. Le bobine di prese a specchio 444, che avvolgono il passaggio di



piccolo diametro 442 e sono alimentate da circuiti di potenza pulsata LC, producono campi a specchio magnetici forti fino a 4T. Lo scopo di questa intera disposizione di bobine è legare strettamente e guidare le superfici di flusso magnetico 455 e i ugelli spruzzatori di plasma fluenti finali 454 nelle camere remote 310 dei divertori 300. In fine, una serie di "antenne" a bobina-sella 460 (vedi Figura 15) sono disposte all'esterno della camera di confinamento 100, due su ogni lato del piano mediano, e sono alimentate da alimentatori cc. Le antenne a bobina-sella 460 possono essere configurate in modo da provvedere un campo magnetico quasi-statico di dipolo o quadrupolo di circa 0.01 T per controllare instabilità di rotazione e/o controllo di corrente di elettroni. Le antenne a bobina-sella 460 possono provvedere flessibilmente campi magnetici che sono o simmetrici o antisimmetrici attorno al piano mediano della macchina, in dipendenza dalla direzione delle correnti applicate.

#### *Sistemi di formazione di potenza pulsata*

I sistemi di formazione di potenza pulsata 210 operano secondo un principio theta-pinch modificato. Ci sono due sistemi che alimentano ognuno una delle sezioni di formazione 200. Figure 4 fino a 6 illustrano i blocchi di costruzione principali e la disposizione dei sistemi di formazione 210. Il sistema di formazione 210 è composto da una disposizione modulare di potenza pulsata che consiste di unità individuali (= pattini) 220 ognuna delle quali energizza una sottoserie di bobine 232 di un insieme di piattine 230 (= piattine) che avvolgono i tubi di formazione in quarzo 240. Ogni pattino 220 è composto da



condensatori 221, induttori 223, commutatori di alta corrente veloci 225 e inneschi associati 222 e circuiti di scarico 224. In totale, ogni sistema di formazione 210 immagazzina fra 350-400 kJ di energia condensatrice, che provvede fino a 35 GW di potenza per formare e accelerare le FRC. L'operazione coordinata di questi componenti si raggiunge attraverso un sistema di innesco e controllo all'avanguardia 222 e 224 che permette la temporizzazione sincronizzata fra i sistemi di formazione 210 su ciascuna sezione di formazione 200 e minimizza il tremolio da commutazione fino a decimi di nanosecondi. Il vantaggio di questa progettazione modulare è il suo funzionamento flessibile: FRC possono essere formate in situ e poi accelerate e iniettate (= formazione statica) o formate e accelerate allo stesso tempo (= formazione dinamica).

*Iniettori di neutri per fusione*

Fasci di atomi neutri 600 sono impiegati nel sistema FRC per provvedere riscaldamento e guida di corrente così come per sviluppare una pressione di particelle veloce. Come mostrato nelle Figure 3A, 3B e 8, le linee di fasci individuali comprendenti sistemi di iniezione di neutri 610 e 640 sono disposte attorno alla camera di confinamento centrale 100 e iniettano particelle veloci tangenzialmente al plasma FRC (e perpendicolari o in corrispondenza di un angolo normale all'asse maggiore di simmetria nel recipiente centrale di confinamento 100) con un parametro di impatto tale che la zona di intrappolamento obiettivo è situata ampiamente all'interno della separatrice 451 (vedi Figura 2). Ogni sistema di iniezione 610 e 640 è



capace di iniettare fino a 1 MW di potenza di neutri nel plasma FRC con le energie di particelle fra 20 e 40 keV. I sistemi 610 e 640 sono basati su fonti di estrazioni di ioni positivi ad aperture multiple e utilizzano l'orientamento geometrico, raffreddamento inerziale delle griglie di estrazione di ioni e pompaggio differenziale. A parte l'utilizzo di diverse  
5 fonti di plasma, i sistemi 610 e 640 sono differenziati primariamente dalla loro progettazione fisica per corrispondere alle loro rispettive posizioni di montaggio, creando capacità di iniezione laterale e superiore. Tipici componenti di questi iniettori di neutri per fusione sono illustrati specificamente nella Figura 7 per i sistemi di iniezione  
10 laterale 610. Come mostrato nella Figura 7, ogni sistema di iniezione di neutri per fusione include una fonte di plasma RF 612 ad un'estremità di ingresso (questa è sostituita con una fonte ad arco nei sistemi 640) con uno schermo magnetico 614 coprente l'estremità. Una fonte ottica di ioni e griglie di accelerazione 616 è accoppiata con la fonte di plasma  
15 612 e una valvola di chiusura 620 è posizionata fra la fonte ottica di ioni e le griglie di accelerazione 616 e un neutralizzatore 622. Un magnete di deviazione 624 e uno scarico di ioni 628 sono posizionati fra il neutralizzatore 622 e un dispositivo di mira 630 all'estremità di  
20 uscita. Un sistema di raffreddamento comprende due crio-refrigeratori 634, due cryopanel 636 e un velo LN2 638. Questa progettazione flessibile permette l'operazione su un ampio range di parametri di FRC.

Una configurazione alternativa per gli iniettori di neutri per fusione 600 è quella di iniettare le particelle veloci tangenzialmente al  
25 plasma di FRC, ma con un angolo  $A$  inferiore a  $90^\circ$  rispetto all'asse



maggiore di simmetria nel recipiente centrale di confinamento 100. Questi tipi di orientamento di iniettori di fasci 615 sono mostrati in Figura 3C. In aggiunta, gli iniettori di fasci 615 possono essere orientati in modo che gli iniettori di fasci 615 su entrambi i lati del piano  
5 mediano del recipiente centrale di confinamento 100 iniettino le loro particelle verso il piano mediano. Infine, la posizione assiale di questi sistemi di fasci 600 può essere scelta più vicino al piano mediano. Queste forme di realizzazione di iniezione alternativa facilitano un'opzione di alimentazione più centrale, che fornisce un  
10 accoppiamento migliore dei fasci e un'efficienza maggiore del trapping delle particelle veloci iniettate. Inoltre, in base all'angolo e alla posizione assiale, questa disposizione degli iniettori di fasci 615 permette un controllo più diretto e indipendente dell'allungamento assiale e di altre caratteristiche della FRC 450. Ad esempio, iniettando i fasci in  
15 corrispondenza di un angolo basso  $A$  rispetto all'asse maggiore di simmetria del recipiente, si creerà un plasma di FRC con estensione assiale maggiore e temperatura più bassa, mentre scegliere un angolo  $A$  più perpendicolare porterà ad un plasma assialmente più corto ma più caldo. In questa maniera l'angolo di iniezione  $A$  e la collocazione degli  
20 iniettori di fasci 615 possono essere ottimizzati per differenti scopi. In aggiunta, un'angolazione e un posizionamento tali degli iniettori di fasci 615 può permettere che fasci di energia più alta (che è generalmente più favorevole per depositare più potenza con meno divergenza di fasci) vengano iniettati in campi magnetici più bassi di quanto non sia  
25 altrimenti necessario per intrappolare tali fasci. Questo è dovuto al fatto



che sia la componente azimutale dell'energia a determinare una scala di orbita di ioni veloci (che diventa progressivamente più piccola mentre l'angolo di iniezione rispetto all'asse maggiore di simmetria del recipiente viene ridotto a energia di fascio costante). Inoltre, l'iniezione angolata verso il piano mediano e con posizioni di fascio assiale vicino al piano mediano migliora l'accoppiamento fascio-plasma, anche quando il plasma di FRC si riduce o altrimenti si contrae assialmente durante il periodo di iniezione.

*Iniettore di pellet*

Per provvedere un mezzo per iniettare nuove particelle e controllare in modo migliore le giacenze di particelle FRC, un iniettore di pellet a 12 cilindri 700 (vedi per esempio I. Vinyar et al., "Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE and HL-2A," Proceedings of the 26<sup>th</sup> Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010)) è utilizzato sul sistema FRC 10. Figura 3 illustra la struttura dell'iniettore di pellet 700 sul sistema di FRC 10. I pellet cilindrici (D~1 mm, L~1-2 mm) sono iniettati nel FRC ad una velocità nel range fra 150-250 km/s. Ogni pellet individuale contiene circa  $5 \times 10^{19}$  atomi di idrogeno, che è paragonabile alle giacenze di particelle FRC.

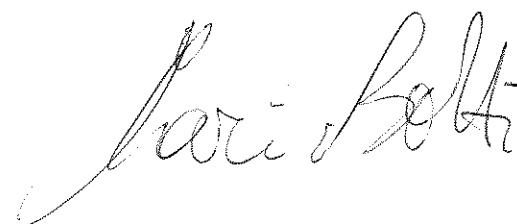
*Sistemi getter*

È ben noto che il gas alogeno neutro è un problema serio in tutti i sistemi di confinamento. Lo scambio di carica e i processi di riciclo (rilascio di materiale di impurità freddo dalla parete) possono avere un effetto devastante sul confinamento di energie e di particelle. In aggiunta, ogni significativa densità di gas neutro al o vicino al bordo



porterà ad immediate perdite di o almeno accorcerà severamente la durata di particelle a grande orbita (alta energia) iniettate (grande orbita si riferisce a particelle aventi orbite sulla scala della topologia di FRC o almeno raggi di orbite maggiori della caratteristica scala del gradiente di lunghezza di campo magnetico) – un fatto che va a detrimento di tutte le applicazioni di plasma energetico, incluso di fusione attraverso riscaldamento con fasci ausiliari.

Il condizionamento di superficie è un mezzo attraverso cui gli effetti dannosi di gas neutro e le impurità possono essere controllate o ridotte in un sistema di confinamento. A questo fine il sistema di FRC provvisto qui impiega sistemi di deposizione al titanio e al litio 810 e 820 che rivestono le superfici rivolte al plasma della camera di confinamento (o recipiente) 100 e i divertori 300 con film (spessi decimi di micrometri) di Ti e/o Li. I rivestimenti sono raggiunti per mezzo di tecniche di deposizione di vapore. Li e/o Ti solidi sono evaporati e/o sublimati e spruzzati sulle superfici adiacenti per formare i rivestimenti. Le fonti sono forni atomici con ugelli guida (nel caso di Li) 822 o sfere riscaldate di solido con copertura di guida (nel caso di Ti) 812. Sistemi di evaporazione Li solitamente operano in modo continuo mentre sublimatori di Ti sono per la maggior parte operati in modo intermittente fra operazioni di plasma. Le temperature di funzionamento di questi sistemi sono sopra a 600°C per ottenere rapidi tassi di deposizione. Per raggiungere una complessiva buona copertura, sono necessari molteplici sistemi di evaporazione/sublimazione posizionati strategicamente. Figura 9 specifica una disposizione



preferita dei sistemi di deposizione getter 810 e 820 nel sistema FRC 10. I rivestimenti funzionano come superfici di getter e pompano in modo efficace specie idrogeni atomiche e molecolari (H e D). I rivestimenti riducono anche altre tipiche impurità come il carbone e l'ossigeno fino a 5 livelli insignificanti.

*Prese a specchio*

Come dichiarato sopra, il sistema FRC 10 impiega serie di bobine a specchio 420, 430, e 444 come mostrato nelle Figure 2 e 3. Una prima serie di bobine a specchio 420 è collocata alle due estremità assiali della camera di confinamento 100 ed è energizzata indipendentemente dalle bobine di confinamento 412, 414 e 416 del sistema magnetico principale 410. La prima serie di bobine a specchio 420 aiuta principalmente a condurre e contenere assialmente la FRC 450 durante la fusione e provvede un controllo di formazione di equilibrio durante il sostentamento. La prima serie di bobine a specchio 420 produce campi magnetici nominalmente superiori (attorno a 0.4 fino a 0.5 T) del campo di confinamento centrale prodotto dalle bobine di confinamento centrali 412. La seconda serie di bobine a specchio 430, che include tre bobine a specchio quasi-CC compatte 432, 434 e 436, è posizionata fra la sezione di formazione 200 e i divertori 300 e sono alimentate da un comune alimentazione elettrica commutante. Le bobine a specchio 432, 434 e 436, assieme alle più compatte bobine di presa a specchio pulsate 444 (alimentate da un alimentatore capacitivo) e il restringimento fisico 442 formano le prese a specchio 440 che provvedono uno stretto sentiero di conduzione gas basso con campi



magnetici molto alti (fra 2 fino a 4 T con tempi di picco di circa 10 fino a 20 ms). Le bobine a specchio pulsate più compatte 444 sono di dimensioni radiali compatte, con un foro di 20 cm e una lunghezza simile, paragonate al design a foro e a pancake in proporzione oltre-il-  
5 metro delle bobine di confinamento 412, 414 e 416. Lo scopo delle prese a specchio 440 è molteplice: (1) Le bobine 432, 434, 436 e 444 fasciano strettamente e guidano le superfici di flusso magnetico 452 e ugelli spruzzatori di plasma fluenti finali 454 all'interno delle camere divertori lontane 300. Questo assicura che le particelle di scarico raggiungano i  
10 divertori 300 in modo appropriato e che ci siano superfici di flusso continuo 455 che si estendano dalla regione di linea di campo aperto 452 della FRC centrale 450 fino ai divertori 300. (2) I restringimenti fisici 442 nel sistema FRC 10, attraverso cui le bobine 432, 434, 436 e 444 abilitano il passaggio delle superfici di flusso magnetico 452 e degli  
15 spruzzatori di plasma 454, provvedono un impedimento al flusso di gas neutro dalle pistole al plasma 350 situate nei divertori 300. Nello stesso modo, i restringimenti 442 impediscono il flusso di ritorno di gas dalle sezioni di formazione 200 ai divertori 300 riducendo così il numero di particelle neutre che deve essere introdotto nell'intero sistema FRC 10  
20 quando si comincia l'avvio di una FRC. (3) I forti specchi assiali prodotti dalle bobine 432, 434, 436 e 444 riducono perdite di particelle assiali e riducono così la diffusività di particelle parallela su linee di campo aperto.

*Pistole al plasma assiale*

25 I flussi di plasma dalle pistole 350 montate nelle camere



divertore 310 dei divertori 300 sono pensate per migliorare la stabilità e le prestazioni di fasci neutrali. Le pistole 350 sono montate su un asse nella camera 310 dei divertori 300 come illustrato nelle Figure 3 e 10 e producono flusso di plasma lungo le linee di flusso aperto 452 nel divertore 300 e verso il centro della camera di confinamento 100. Le pistole 350 si azionano ad uno scarico di gas ad alta densità in un canale a -pila di rondelle e sono progettate per generare numerosi kiloampere di plasma pienamente ionizzato per 5 fino a 10 ms. Le pistole 350 includono una bobina magnetica pulsata che si accorda con il flusso di plasma in uscita con la dimensione desiderata del plasma nella camera di confinamento 100. I parametri tecnici delle pistole 350 sono caratterizzate da un canale avente un diametro esterno dai 5 ai 13 cm e un diametro interno fino a 10 cm e provvedono una corrente di scarico di 10-15 kA a 400-600 V con un campo magnetico interno alla pistola di 0.5 fino a 2.3 T.

I flussi delle pistole al plasma possono penetrare i campi magnetici delle prese a specchio 440 e fluire dentro alla sezione di formazione 200 e la camera di confinamento 100. L'efficienza del trasferimento di plasma attraverso la presa a specchio 440 cresce con la decrescita della distanza fra la pistola 350 e la presa 440 e facendo la presa 440 più larga e più corta. In condizioni ragionevoli, le pistole 350 possono fornire circa  $10^{22}$  protoni/s attraverso la prese a specchio 440 di 2 fino a 4 T ad alte temperature di ioni ed elettroni di circa 150 fino a 300 eV e di circa 40 fino a 50 eV, rispettivamente. Le pistole 350 provvedono un rifornimento significativo dello strato di bordo di FRC



456, e un generale miglioramento di confinamento di particelle FRC.

Per incrementare ulteriormente la densità di plasma, può essere utilizzata una scatola del gas per soffiare gas aggiuntivo nel flusso di plasma delle pistole 350. Questa tecnica permette un  
5 incremento di numerose volte nella densità del plasma iniettato. Nel sistema FRC 10, una scatola del gas installata sul lato del divertore 300 delle prese a specchio 440 migliora il rifornimento dello strato del bordo di FRC 456, la formazione del FRC 450 e la legatura in linea del plasma.

Dati tutti i parametri di regolazione descritti sopra e  
10 prendendo inoltre in considerazione che è possibile operare con solo una o entrambe le pistole, è prontamente apparente che è accessibile un largo spettro di modalità operative.

#### *Elettrodi di polarizzazione*

La polarizzazione elettrica di superfici di flusso aperto può  
15 provvedere potenziali radiali che danno luogo a movimento azimutale  $E \times B$  che provvedono un meccanismo di controllo, analogo a girare una manopola, in modo da poter controllare la rotazione del plasma della linea di campo aperto così come l'effettivo centro della FRC 450 attraverso la velocità di taglio. Per raggiungere questo controllo, il  
20 sistema FRC 10 impiega vari elettrodi strategicamente posizionati in varie parti della macchina. La Figura 3 mostra elettrodi di polarizzazione posizionati in posizioni preferite all'interno del sistema FRC 10.

In principio, ci sono 4 classi di elettrodi: (1) elettrodi a punto  
25 905 nella camera di confinamento 100 che entrano in contatto con



particolari linee di campo aperto 452 sul bordo del FRC 450 per  
provvedere caricamento locale, (2) elettrodi anulari 900 fra la camera di  
confinamento 100 e le sezioni di formazione 200 per caricare strati di  
flusso di bordo estremo 456 in una maniera simmetrica azimutale, (3)  
5 pile di elettrodi concentrici 910 nei divertori 300 per caricare molteplici  
bordi di flusso concentrico 455 (in cui la selezione dei bordi è  
controllabile regolando le bobine 416 per regolare il campo magnetico  
del divertore in modo da far terminare i bordi di flusso desiderati 456  
sugli elettrodi appropriati 910), e infine (4) gli anodi 920 (vedi Figura 10)  
10 delle pistole al plasma 350 stesse (che intercettano superfici di flusso  
aperto interne 455 vicine alla separatrice della FRC 450). Figure 10 e 11  
mostrano alcune tipiche progettazioni per alcune di queste.

In tutti i casi questi elettrodi sono alimentati da fonti di  
potenza pulsate o cc di voltaggio fino a 800V. A seconda della  
15 dimensione dell'elettrodo e di quali superfici di flusso sono intersecate,  
le correnti possono essere trascinate nello spettro di kilo-ampere.

Funzionamento non-sostenuto del sistema FRC - Regime  
convenzionale

La formazione di plasma standard sul sistema FRC 10 segue  
20 la tecnica ben sviluppata del theta-pinch-a-inversione-di-campo. Un  
processo tipico per avviare una FRC comincia conducendo le bobine  
quasi cc 412, 414, 416, 420, 432, 434 e 436 all'operazione in stato  
stabile. I circuiti di potenza pulsata RFTP dei sistemi di formazione di  
potenza pulsata 210 in seguito conducono le bobine pulsate veloci  
25 inverse di campo magnetico 232 alla creazione di una polarizzazione



temporaneamente invertita di circa  $-0.05$  T nelle sezioni di formazione 200. A questo punto una quantità predeterminata di gas neutro a 9-20 psi è iniettata nei due volumi di formazione definiti dalle camere a tubo di quarzo 240 delle sezioni di formazione (a nord e sud) 200 per mezzo  
5 di una serie di valli di soffio orientate in modo azimutale posizionate su estremità esterne delle sezioni di formazione 200. In seguito un piccolo campo RF (<centinaia di kilo-hertz) è generato da una serie di antenne sulla superficie dei tubi di quarzo 240 per creare una pre-ionizzazione nella forma di regioni locali di ionizzazione di semina all'interno di  
10 colonne di gas neutro. Questo è raggiunto applicando una modulazione a squillo theta-ringing sulla corrente alimentando le bobine pulsate veloci inverse di campo magnetico 232 per creare un campo polarizzato in avanti fino a  $0.4$  T. Questo passo può essere sequenziato temporalmente in modo tale che il campo polarizzato in avanti sia  
15 generato uniformemente attraverso la lunghezza dei tubi di formazione 240 (formazione statica) oppure in modo tale che una modulazione di campo peristaltico consecutiva sia realizzata lungo l'asse dei tubi di formazione 240 (formazione dinamica).

In questo intero processo di formazione, l'effettiva inversione  
20 di campo nel plasma si realizza rapidamente, all'interno di circa  $5\mu s$ . La potenza pulsata di multi-gigawatt fornita al plasma in formazione produce prontamente FRC calde che sono poi espulse dalle sezioni di formazione 200 per mezzo di applicazione di una modulazione a tempo sequenziato del campo magnetico frontale (peristalsi magnetica) oppure  
25 correnti temporaneamente incrementate nelle ultime bobine delle serie



di bobine 232 vicino alle estremità esterne assiali dei tubi di formazione 210 (formando un gradiente di campo magnetico assiale che punta assialmente verso la camera di confinamento 100). Le due FRC di formazione (nord e sud) formate e accelerate in questo modo in seguito  
5 si espandono nella camera di confinamento di più largo diametro 100, in cui le bobine quasi-CC producono un campo polarizzato in avanti per controllare l'espansione radiale e provvedere il flusso esterno magnetico di equilibrio.

Una volta che le FRC da formazione di nord e sud arrivano  
10 vicino al piano mediano della camera di confinamento 100, le FRC entrano in collisione. Durante la collisione le energie cinetiche assiali delle FRC di formazione di nord e sud sono termalizzate largamente mentre le FRC si fondono infine in un'unica FRC 450. Nella camera di  
15 confinamento 100 è disponibile una grande serie di strumenti di diagnostica di plasma per studiare gli equilibri della FRC 450. Condizioni di operazione tipiche nel sistema FRC 10 producono FRC composte con raggi di separatrice di circa 0.4 m e circa 3 m di estensione assiale. Ulteriori caratteristiche sono i campi magnetici  
20 esterni di circa 0.1 T, densità di plasma di circa  $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  e una temperatura di plasma totale fino ad 1 keV. Senza alcun sostentamento, ossia senza riscaldamento e/o alimentazione di corrente attraverso iniezione di fasci neutri o altri mezzi ausiliari, la durata di vita di queste FRC è limitata a circa 1 ms, il tempo di decadenza di configurazione  
caratteristico indigeno.

25 Dati sperimentali di funzionamento non sostenuto - Regime



convenzionale

La Figura 12 mostra una tipica evoluzione temporale del raggio di flusso escluso,  $r_{\Delta\Phi}$ , la quale è approssimativa al raggio di separatrice,  $r_s$ , per illustrare le dinamiche del processo di fusione theta-pinch della FRC 450. I due plasmoidi individuali (nord e sud) sono prodotti simultaneamente e poi accelerati fuori dalle rispettive sezioni di formazione 200 ad una velocità supersonica,  $v_z \sim 250$  km/s, ed entrano in collisione vicino al piano mediano a  $z = 0$ . Durante la collisione i plasmoidi si comprimono assialmente, seguiti da una rapida espansione radiale ed assiale, prima di fondersi infine per formare una FRC 450. Entrambe le dinamiche radiali ed assiali della FRC in fusione sono evidenziate da misurazioni di profili di densità dettagliate e tomografia a base di bolometro.

I dati di uno scarico rappresentativo non-sostenuto del sistema FRC 10 sono mostrati come funzioni di tempo nella Figura 13. La FRC è avviata a  $t = 0$ . Il raggio di flusso escluso al piano mediano assiale della macchina è mostrato nella Figura 13(a). Questi dati sono ottenuti da una varietà di sonde magnetiche, posizionate appena dentro alla parete di acciaio inossidabile della camera di confinamento, che misurano il campo magnetico assiale. La parete di acciaio è un buon conservatore di flusso sulle scale temporali di questo scarico.

Densità integrate in linea sono mostrate in Figura 13(b), da un interferometro a 6 corde CO<sub>2</sub>/He-Ne posizionato a  $z = 0$ . Prendendo in considerazione lo spostamento verticale ( $y$ ) di FRC, così come misurato da tomografia a bolometro, l'inversione Abel crea i contorni di densità



delle Figure 13(c). Dopo alcuni sciabordi assiali e radiali durante i primi 0.1 ms, la prima FRC si deposita con un profilo di densità cavo. Questo profilo è alquanto piatto, con una sostanziale densità sull'asse, come richiesto da tipici equilibri 2-D FRC.

5           La temperatura totale di plasma è mostrata nella Figura 13(d), derivata da un bilancio di pressione e pienamente coerente con dispersione Thomson e misurazioni di spettroscopia.

10           L'analisi dell'intero arrangiamento di flusso escluso indica che la forma di separatrice FRC (avvicinata dai profili assiali di flusso escluso) si evolve gradualmente da circuitale ad ellittica. Questa evoluzione, mostrata nella Figura 14, è coerente con una riconnessione graduale magnetica di da due fino ad una FRC. Infatti, stime approssimative suggeriscono che in questo particolare istante circa 10% dei due iniziali flussi magnetici FRC si riconnettono durante la  
15 collisione.

20           La lunghezza di FRC si restringe stabilmente da 3 fino a circa 1 m durante il tempo di vita della FRC. Questo restringimento, visibile nella Figura 14, suggerisce che principalmente la perdita di energia convettiva domina il confinamento di FRC. Mentre la pressione di plasma decresce all'interno della separatrice in modo più rapido della pressione magnetica esterna, la tensione di linee di campo magnetico nelle regioni estreme comprime la FRC assialmente, ristabilendo l'equilibrio assiale e radiale. Per lo scarico discusso nelle Figure 13 e 14, il flusso magnetico di FRC, le giacenze di particelle, e l'energia termale  
25 (di circa 10 mWb, particelle  $7 \times 10^{19}$ , e 7 kJ, rispettivamente) decresce



approssimativamente di un ordine di grandezza nel primo millisecondo, quando l'equilibrio di FRC sembra placarsi.

Funzionamento sostenuto - Regime HPF

5 Gli esempi nelle Figure dalla 12 alla 14 sono caratteristiche di FRC decadenti senza alcun sostentamento. Tuttavia, sono impiegate diverse tecniche sul sistema FRC 10 per migliorare ulteriormente il confinamento di FRC (cuore interno e strato di bordo) del regime HPF e sostenere la configurazione.

*Fasci neutrali*

10 Prima, neutri veloci (H) sono iniettati in modo perpendicolare a  $B_z$  in fasci dagli 8 iniettori di raggi neutri 600. I fasci di neutri veloci sono iniettati dal momento in cui le NRC di formazione nord e sud si fondono nella camera di confinamento 100 in una sola FRC 450. Gli ioni veloci, creati primariamente attraverso lo scambio di carica, hanno  
15 orbite di betatrone (con raggi primari sulla scala della topologia FRC o almeno molto più grandi della caratteristica scala di gradiente di lunghezza di campo magnetico) che si aggiungono alla corrente azimutale della FRC 450. Dopo qualche frazione dello scarico (dopo da 0.5 fino a 0.8 ms dallo sparo), una popolazione di ioni veloci  
20 sufficientemente grande migliora significativamente la stabilità interna e le proprietà di confinamento della FRC (vedi per esempio *M.W. Binderbauer e N. Rostoker, Plasma Phys. 56, parte 3, 451 (1996)*). Inoltre, da un punto di vista di sostentamento, i fasci dagli iniettori di fasci neutrali 600 sono anche i mezzi primari per fornire corrente e  
25 calore al plasma FRC.



Nel regime di plasma del sistema FRC 10, gli ioni veloci rallentano principalmente sugli elettroni di plasma. Durante la prima parte di uno scarico, tipici tempi di rallentamento in media di orbita di ioni veloci sono 0.3-0.5 ms, il che risulta in significativo riscaldamento di FRC, principalmente da elettroni. Gli ioni veloci compiono grandi escursioni radiali fuori dalla separatrice perché il campo magnetico di FRC interno è per natura basso (circa 0.03 T in media per un campo assiale esterno di 0.1 T). Gli ioni veloci sarebbero vulnerabili alle perdite di scambio di carica, se la densità del gas neutro fosse troppo alta fuori dalla separatrice. Quindi, gettering a parete e altre tecniche (come la pistola al plasma 350 e prese a specchio 440 che contribuiscono, fra le altre cose, al controllo di gas) impiegati sul sistema FRC 10 tendono a minimizzare neutri di bordo e abilitare la costruzione richiesta di una corrente di ioni veloci.

15 *Iniezione di pellet*

Quando è costruita una significativa popolazione di ioni veloci all'interno della FRC 450, con temperature di elettroni più alte e durate di vita FRC più lunghe, sono iniettati pellet congelati H o D all'interno della FRC 450 dall'iniettore di pellet 700 in modo da sostenere le giacenze di particelle FRC della FRC 450. Le scale temporali di ablazione anticipata sono sufficientemente corte per provvedere una significativa fonte di particelle FRC. Questo tasso può essere anche incrementata allargando l'area di superficie del pezzo iniettato rompendo il pellet individuale in frammenti più piccoli mentre è nelle canne o tubi di iniezione dell'iniettore di pellet 700 e prima di entrare



nella camera di confinamento 100, un passo che può essere raggiunto incrementando la frizione fra il pellet e le pareti del tubo di iniezione stringendo il raggio di piegamento dell'ultimo segmento del tubo di iniezione appena prima dell'ingresso nella camera di confinamento 100.

5 Per mezzo della variazione della sequenza e del tasso di sparo delle 12 canne (tubi di iniezione) così come per la frammentazione, è possibile accordare il sistema di iniezione pellet 700 affinché provveda esattamente il livello desiderato di sostentamento di giacenze di particelle. In cambio, questo aiuta a mantenere la pressione cinetica  
10 interna nella FRC 450 e l'operazione e la durata di vita sostenuta della FRC 450.

Una volta che gli atomi asportati hanno incontrato plasma significativo nella FRC 450, diventano pienamente ionizzati. Il risultante componente di plasma freddo viene poi riscaldato per collisione per  
15 mezzo del plasma FRC indigeno. L'energia necessaria a mantenere la temperatura desiderata di FRC è infine fornita dagli iniettori di fasci 600. In questo senso gli iniettori di pellet 700 insieme agli iniettori di fasci neutri 600 formano il sistema che mantiene uno stato stabile e sostengono la FRC 450.

20 *Bobine di sella*

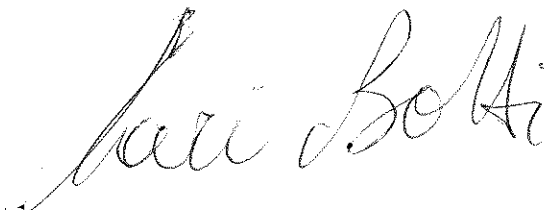
Per realizzare un'alimentazione di corrente di stato stabile e mantenere la corrente di ioni richiesta è desiderabile prevenire o ridurre significativamente l'accelerazione di elettroni dovuta alla forza di frizione degli elettroni-ioni (risultante dal trasferimento di momento di elettroni  
25 di ioni di collisione). Il sistema FRC 10 utilizza una tecnica innovativa



per provvedere una rottura di elettroni attraverso un campo di dipolo o quadripolo statico magnetico applicato esternamente. Questo si realizza per mezzo di bobine di sella esterne 460 illustrate nella Figura 15. Il campo radiale magnetico applicato trasversale dalle bobine di sella 460 induce un campo elettrico assiale nel plasma FRC rotante. La corrente di elettroni assiale risultante interagisce con il campo radiale magnetico per produrre una forza di rottura azimutale sugli elettroni,  $F_e = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$ . Per condizioni tipiche nel sistema FRC 10, il campo magnetico di dipolo (o quadripolo) applicato richiesto nel plasma richiede di essere soltanto dell'ordine 0.0001 T è abbastanza piccola da non causare perdite di particelle veloci apprezzabili o confinamento di impatto altrimenti negativamente. Di fatto, il campo di dipolo (o quadruplo) magnetico applicato contribuisce a sopprimere instabilità. In combinazione con l'iniezione di fasci neutri tangenziali e l'iniezione di plasma assiale, le bobine di sella 460 provvedono un livello aggiuntivo di controllo con rispetto alla manutenzione e stabilità di corrente.

*Prese a specchio*

La progettazione delle bobine pulsate 444 all'interno delle prese a specchio 440 permettono la generazione locale di alti campi magnetici (da 2 a 4 T) con modesta energia capacitiva (di circa 100 kJ). Per la formazione di campi magnetici tipici della presente operazione del sistema di FRC 10, tutte le linee di campo all'interno del volume di formazione passano attraverso i restringimenti 442 vicino alle prese a specchio 440, come suggerito dalle linee di campo magnetico nella Figura 2 e non avviene contatto di pareti plasma. Inoltre, le prese a



specchio 440 in tandem con i magneti divertori quasi-CC 416 possono essere aggiustate in modo tale da guidare le linee di campo sugli elettrodi divertori 910, oppure allargare le linee di campo in una configurazione a cuspidale finale (non mostrato). Quest'ultima migliora la  
5 stabilità e sopprime la conduzione termale di elettroni parallela.

Le prese a specchio 440 da sé contribuiscono anche al controllo di gas neutro. Le prese a specchio 440 permettono un utilizzo migliore del gas deuterio soffiato nei tubi di quarzo durante la formazione di FRC, dal momento che il riflusso di gas nei divertori 300 è  
10 significativamente ridotto dalla piccola conduttanza dei gas delle prese (scarsi 500 L/s). La maggior parte del gas soffiato residuo nei tubi di formazione 210 è velocemente ionizzato. In aggiunta, il plasma ad alta densità fluente attraverso le prese a specchio 440 provvede un'efficiente ionizzazione di neutri e perciò un'efficiente barriera contro gas. Come  
15 risultato, la maggior parte dei neutri riciclati nei divertori 300 dallo strato di bordo della FRC 456 non ritornano alla camera di confinamento 100. In aggiunta, i neutri associati all'operazione di pistole al plasma 350 (come discusso sotto) saranno per la maggior parte confinati ai divertori 300.

20 Infine, le prese a specchio 440 tendono a migliorare il confinamento di strato di bordo di FRC. Con rapporti di specchio (presa/campi magnetici di confinamento) nell'arco di 20 a 40, e con una lunghezza di 15 m fra le prese a specchio a nord e sud, il tempo di confinamento particelle dello strato di bordo.  $\tau_{||}$  incrementa  
25 prontamente il confinamento di particelle FRC.



Assumendo la perdita radiale diffusiva ( $D$ ) di particelle dal volume di separatrice 453 bilanciato dalla perdita assiale ( $\tau_{\parallel}$ ) dallo strato di bordo 456, si ottiene  $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$ , da cui la lunghezza del gradiente di densità della separatrice può essere riscritta  
 5 come  $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ . Qui  $r_s$ ,  $L_s$  e  $n_s$  sono raggio di separatrice, lunghezza di separatrice e densità di separatrice, rispettivamente. Il tempo di confinamento di particelle FRC è  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s) (\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ , in cui  $\tau_{\perp} = a^2/D$  con  $a = r_s/4$ . Fisicamente, migliorare  $\tau_{\parallel}$  porta a  $\delta$  aumentati (ridotto gradiente di densità di separatrice e  
 10 parametro di deriva), e, per questo, ridotta perdita di particelle FRC. Il miglioramento complessivo nel confinamento di particelle FRC è generalmente alquanto minore di quadratico perché  $n_s$  cresce con  $\tau_{\parallel}$ .

Un miglioramento significativo in  $\tau_{\parallel}$  richiede che lo strato di bordo 456 rimanga grossolanamente stabile (ossia, niente flauto  $n = 1$ ,  
 15 manichetta, o altra instabilità MHD tipica di sistemi aperti). L'utilizzo delle pistole plasma 350 provvede questa stabilità di bordo preferita. In questo senso, le prese a specchio 440 e la pistola al plasma 350 formano un sistema di controllo bordo efficiente.

#### *Pistole al plasma*

20 Le pistole al plasma 350 migliorano la stabilità degli ugelli spruzzatori di scarico della FRC 454 attraverso legatura in linea. Il plasma dalle pistole al plasma 350 sono generati senza momento azimutale angolare, il che si rivela utile nel controllo delle instabilità rotazionali delle FRC. Dal momento che tali pistole 350 sono un mezzo  
 25 efficiente per controllare la stabilità FRC senza il bisogno di della



tecnica di stabilizzazione quadrupolo più vecchia. Come risultato, le pistole al plasma 350 rendono possibile lo sfruttamento degli effetti benefici delle particelle veloci o l'accesso al regime di FRC ibrido cinetico come delineato in questa spiegazione. Quindi, le pistole al plasma 350  
5 abilitano il sistema FRC 10 ad essere operato con correnti di bobine di sella appena adeguate per rompere gli elettroni ma sotto al limite che causerebbe instabilità di FRC e/o condurrebbe ad una drammatica veloce diffusione di particelle.

Come menzionato sopra nella discussione *Preso a specchio*, se  
10  $\tau_{\parallel}$  può essere migliorato significativamente, il plasma da pistola fornito sarà paragonabile al tasso di perdita di particelle dello strato di bordo ( $\sim 10^{22}/s$ ). La durata di vita del plasma prodotto con pistola nel sistema FRC 10 è nell'arco dei millisecondi. Infatti, il plasma di fucile è da considerarsi con densità  $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  e con una temperatura degli ioni  
15 di circa 200 eV, confinato fra le prese a specchio terminali 440. La lunghezza della trappola L e il rapporto di specchio R sono di circa 15 m e 20, rispettivamente. Il percorso medio libero degli ioni dovuta alla collisione di Coulomb è  $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$  e, poiché  $\lambda_{ii} \ln R / R < L$ , gli ioni sono confinati nel regime della dinamica di gas. Il tempo di confinamento del  
20 plasma in questo regime è di  $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ ms}$ , in cui  $V_s$  è la velocità del suono di ione. In confronto, il classico tempo di confinamento per questi parametri di plasma sarebbe  $\tau_c \sim 0.5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7 \text{ ms}$ . La diffusione trasversale anomala può, in principio, restringere il tempo di confinamento del plasma. Tuttavia, nel sistema FRC 10, se assumiamo  
25 il tasso di diffusione Bohm, il tempo di confinamento per il plasma da

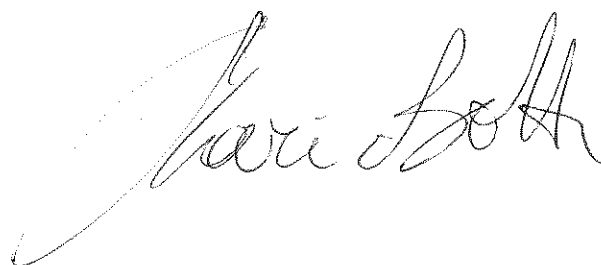
pistola stimato è  $\tau_L > \tau_{gd} \sim 2$  ms. Quindi, le pistole procurerebbero un significativo rifornimento dello strato di bordo FRC 456, e un confinamento di particelle FRC generalmente migliorato.

Inoltre, i flussi di plasma di pistola possono essere accesi in  
5 circa 150 fino a 200 microsecondi, il che permette l'utilizzo nell'avvio, la  
traslazione, e la fusione nella camera di confinamento 100 della FRC. Se  
accesso attorno a  $t < 0$  (inizio banco principale FRC), i plasma di pistola  
aiutano a sostenere la presente FRC 450 formata e fusa  
dinamicamente. Le giacenze di particelle combinate dalle FRC di  
10 formazione e dalle pistole sono adeguati per la cattura di fasci di neutri,  
riscaldamento di plasma, e sostentamento lungo. Se acceso a  $t$  nell'arco  
da -1 a 0 ms, i plasma da pistola possono riempire i tubi di quarzo 210  
con plasma o ionizzare il gas soffiato nei tubi di quarzo, permettendo  
così una formazione di FRC con una quantità ridotta o forse anche zero  
15 gas soffiato. Quest'ultimo può richiedere plasma da formazione  
sufficientemente freddo per permettere la diffusione veloce del campo  
magnetico polarizzato invertito. Se accesi a  $t < -2$  ms, i flussi di plasma  
possono riempire il volume di linea di campo di circa 1 fino a 3 m<sup>3</sup> delle  
regioni di formazione e confinamento delle sezioni di formazione 200 e  
20 della camera di confinamento 100 con un obiettivo di densità di plasma  
di alcuni 10<sup>13</sup> cm<sup>-3</sup>, sufficienti a permettere la costruzione di fasci neutri  
prima dell'arrivo di una FRC. Le FRC di formazione potrebbero poi  
essere formate e traslate nel risultante plasma di recipiente di  
confinamento. In questo modo le pistole di plasma 350 abilitano una  
25 grande varietà di condizioni di operazione e di regimi di parametri.



*Polarizzazione elettrica*

Il controllo del profilo del campo radiale elettrico nello strato di bordo 456 è benefico in vari modi alla stabilità e al confinamento di FRC. Grazie ai componenti di polarizzazione innovativi impiegati nel sistema FRC 10 è possibile applicare una varietà di distribuzioni intenzionali di potenziali elettrici ad un gruppo di superfici di flusso aperto attraverso la macchina da aree ben al di fuori della regione di confinamento centrale nella camera di confinamento 100. In questo modo possono essere generati campi elettrici radiali attraverso lo strato di bordo 456 appena fuori dalla FRC 450. Questi campi elettrici radiali poi modificano la rotazione azimutale dello strato di bordo 456 e l'effetto è il confinamento attraverso velocità di taglio  $E \times B$ . Qualsiasi rotazione differenziale fra lo strato di bordo 456 e il centro della FRC 453 può essere poi trasmessa all'interno del plasma FRC per mezzo di taglio. Qualsiasi rotazione differenziale fra lo strato di bordo 456 e il centro di FRC 453 può poi essere trasmessa all'interno del plasma FRC per taglio. Come risultato, controllare lo strato di bordo 456 ha un impatto diretto sul centro di FRC 453. Inoltre, dal momento che l'energia libera nella rotazione di plasma può essere anche responsabile di instabilità, questa tecnica provvede un mezzo diretto per controllare l'inizio e la crescita di instabilità. Nel sistema di FRC 10, una polarizzazione dei bordi appropriata provvede un controllo effettivo di trasporto di linee di campo aperto e di rotazione così come rotazione di centro di FRC. La posizione e la forma dei vari elettrodi forniti 900, 905, 910 e 920 permette di controllare diversi gruppi di superfici di flusso 455 e a



diversi e indipendenti potenziali. In questo modo una grande vastità di diverse configurazioni di campo elettrico e di forze possono essere realizzate, ognuna con un diverso impatto caratteristico sulle prestazioni del plasma.

5 Un vantaggio chiave di tutte queste innovative tecniche di polarizzazione è il fatto che il comportamento di plasma centrale e di bordo può essere influenzato da ben fuori dal plasma FRC, ossia non vi è bisogno di portare alcun componente fisico in contatto col plasma centrale caldo (il che avrebbe severe implicazioni per l'energia, il flusso e  
10 la perdita di particelle). Questo ha un grande impatto benefico sulle prestazioni e su tutte le potenziali applicazioni del concetto HPF.

Dati sperimentali – Funzionamento HPF

L'iniezione di particelle veloci per mezzo di fasci dalle pistole di fasci neutri 600 ha un importante ruolo nell'abilitare il regime HPF.  
15 Figura 16 illustra questo fatto. È illustrata una serie di curve mostranti come il tempo di vita della FRC si colleghi alla lunghezza delle pulsazioni dei fasci. Tutte le altre condizioni di funzionamento sono tenute costanti per tutti gli scarichi compresi questo studio. I dati sono calcolati come media di molti spari e, perciò, rappresentano un  
20 comportamento tipico. È chiaramente evidente che una durata di raggio più lunga produce FRC più longeve. Guardando questa prova così come altre diagnosi durante questo studio, dimostra che i fasci accrescono stabilità e riducono perdite. La correlazione fra lunghezza di pulsazione di fasci e la durata di vita non è perfetta dal momento che  
25 l'intrappolamento di fascio diventa inefficiente al di sotto di una certa

dimensione di plasma, ossia, dal momento che la FRC 450 si ridimensiona fisicamente non tutti i raggi iniettati sono intercettati e intrappolati. Il ridimensionamento della FRC è primariamente dovuto al fatto che la netta perdita di energia (<4 MW intorno alla metà di tutto lo scarico) dal plasma della FRC durante lo scarico è alquanto più grande della totale potenza immessa nella FRC attraverso i fasci di neutri (~ 2.5 MW) per la particolare impostazione sperimentale. Posizionare i fasci in una posizione più vicina al piano mediano del recipiente 100 tenderebbe a ridurre queste perdite ed estendere la durata di vita delle FRC.

10           Figura 17 illustra gli effetti dei diversi componenti per realizzare il regime HPF. Mostra una famiglia di curve tipiche illustranti la durata di vita della FRC 450 come una funzione del tempo. In tutti i casi una costante, una modesta quantità di potenza di fascio (circa 2.5 MW) è iniettata per la totale durata di ogni scarico. Ogni curva è rappresentativa di una diversa combinazione di componenti. Per esempio, far funzionare il sistema FRC 10 senza prese a specchio 440, pistole al plasma 350 o gettering dai sistemi getter 800 risulterebbe in un rapido avvio di instabilità rotazionale e perdita della topologia FRC. Aggiungendo soltanto le prese a specchio 440 si ritarda l'avvio di instabilità e si aumenta il confinamento. Utilizzando la combinazione di prese a specchio 440 e una pistola al plasma 350 riduce ulteriormente instabilità e accresce la durata di vita della FRC. Infine aggiungendo gettering (Ti in questo caso) oltre alla pistola 350 e alle prese 440 porta ai migliori risultati – la FRC risultante è priva di instabilità e esibisce la durata di vita più lunga. Diventa chiaro da questa dimostrazione

15  
20  
25



sperimentale, che la piena combinazione dei componenti produce il miglior effetto e provvede i fasci con le migliori condizioni da obiettivo.

Come mostrato nella Figura 1, il regime di HPF scoperto di recente esibisce comportamenti di trasporto drammaticamente migliorati. Figura 1 illustra il cambiamento nel tempo di confinamento di particelle nel sistema FRC 10 fra il regime convenzionale e il regime HPF. Come può essere visto, è migliorato di un fattore ben oltre a 5 nel regime HPF. In aggiunta, Figura 1 specifica il tempo di confinamento di particelle nel sistema FRC 10 in relazione al tempo di confinamento di particelle in precedenti esperimenti FRC convenzionali. Con riguardo a queste altre macchine, il regime HPF del sistema FRC 10 ha migliorato il confinamento di un fattore compreso fra 5 e vicino a 20. Infine e più importante, la natura della misurazione di confinamento del sistema FRC 10 nel regime HPF è drammaticamente diversa da tutte le misurazioni precedenti. Prima della creazione del regime HPF nel sistema FRC 10, sono state derivate varie leggi di scalatura empirica da dati per prevedere tempi di confinamento in esperimenti FRC precedenti. Tutte queste regole di scalatura dipendono soprattutto dal rapporto  $R^2/\rho_i$ , in cui R è il raggio del punto nullo del campo magnetico (una misura approssimativa della scala fisica della macchina) e  $\rho_i$  è il raggio di larmor di ione valutato nel campo applicato esternamente (una misura approssimativa del campo magnetico applicato). È chiaro dalla Figura 1 che il confinamento lungo in FRC convenzionali è solo possibile con grandi dimensioni di macchina e/o un campo magnetico alto. L' funzionamento del sistema FRC 10 nel regime FRC convenzionale CR



tende a seguire queste regole di scalatura, come indicato nella Figura 1. Tuttavia, il regime HPF è ampiamente superiore e mostra che un confinamento molto migliore è ottenibile, senza grandi dimensioni di macchina o campi magnetici alti. Più importante, è anche chiaro dalla  
5 Figura 1 che il regime HPF risulta in tempo di confinamento migliorato con dimensioni di plasma ridotte in paragone al regime CR. Tendenze simili sono visibili anche per i tempi di confinamento per il flusso e per l'energia, come descritto di sotto, che sono altrettanto cresciuti di un fattore oltre a 3-8 nel sistema di FRC 10. La breccia del regime HPF,  
10 quindi, rende possibile l'utilizzo di potenza di fascio modesta, campi magnetici inferiori e dimensioni più piccole per sostenere e mantenere gli equilibri di FRC nel sistema FRC 10 e in future macchine ad energia più alta. Mano nella mano con questi miglioramenti vengono costi di funzionamento e costruzione più bassi così come una complessità di  
15 ingegneristica ridotta.

Per ulteriori paragoni, Figura 18 mostra dati da uno scarico di un regime HPF rappresentativo nel sistema FRC 10 come funzione del tempo. Figura 18(a) illustra il raggio di flusso escluso in corrispondenza del piano mediano. Per queste scale temporali più lunghe la parete di  
20 acciaio conducente non è più un buon conservatore di flusso e le sonde magnetiche interne alla parete sono rinforzate con sonde esterne alla parete per rendere conto in modo adeguato della diffusione di flusso magnetico attraverso l'acciaio. Paragonata a prestazioni tipiche nel regime convenzionale CR, come mostrato nella Figura 13, la modalità di  
25 funzionamento del regime HPF esibisce più di 400% di durata di vita



più lunga.

Un andamento rappresentativo della traccia di densità integrata in linea è mostrato nella Figura 18(b) con il suo complemento inverso di Abel, i contorni di densità, nella Figura 18(c). Paragonato al regime FRC convenzionale CR, come mostrato nella Figura 13, il plasma è più quiescente durante la pulsazione, indicativo di un funzionamento molto stabile. La densità di picco è anche leggermente inferiore negli spari HPF – questa è una conseguenza della temperatura totale del plasma più calda (fino ad un fattore di 2) come mostrato nella Figura 18 (d).

Per lo scarico rispettivo illustrato nella Figura 18, i tempi di confinamento di energia, particelle e flusso sono 0.5 ms, 1 ms e 1 ms, rispettivamente. A un tempo di riferimento di 1 ms durante lo scarico, l'energia di plasma immagazzinata è di 2 kJ mentre le perdite sono di circa 4 MW, rendendo questo obiettivo molto adeguato per il sostentamento di fasci neutri.

Figura 19 riassume tutti i vantaggi del regime HPF nella forma di una scalatura di confinamento flusso di un HPF sperimentale di recente fondazione. Come può essere visto nella Figura 19, in base a misurazioni prese prima e dopo  $t = 0.5$  ms, ossia,  $t \leq 0.5$  ms e  $t > 0.5$  ms, il confinamento di flusso (e similmente, confinamento di particelle e confinamento di energia) scala grosso modo con il quadrato della temperatura di elettroni ( $T_e$ ) per un dato raggio di separatrice ( $r_s$ ). Questa forte scalatura con una potenza positiva di  $T_e$  (e non potenza negativa) è completamente opposta a quella esibita da tokamak



convenzionali, in cui il confinamento è tipicamente inversamente  
proporzionale a qualche potenza della temperatura di elettroni. La  
manifestazione di questa scalatura è una conseguenza diretta dello  
stato HPF e della popolazione di ioni di grande orbita (ossia orbite sulla  
5 scala della topologia FRC e/o al meno la scala di gradiente di lunghezza  
di campo magnetico caratteristica). Fondamentalmente, questa nuova  
scalatura sostanzialmente favorisce alte temperature di funzionamento  
e rende possibili reattori di dimensioni relativamente modeste.

Con i vantaggi che il regime HPF presenta, è raggiungibile un  
10 sostentamento o stato stabile della FRC determinato da fasci neutri e  
usando un'adeguata iniezione di pellet, ossia parametri di plasma  
globali come energia termica di plasma, numero totale di particelle,  
raggio e lunghezza del plasma così come flusso magnetico sono  
sostenibili a livelli ragionevoli senza decadenza sostanziale. Per  
15 confronto, la Figura 20 mostra i dati nel diagramma A da uno scarico di  
regime HPF indicativo nel sistema FRC 10 in funzione del tempo e nel  
diagramma B per uno scarico di regime HPF indicativo proiettato nel  
sistema FRC 10 in funzione del tempo in cui la FRC 450 è sostenuta  
senza decadenza durante la durata delle pulsazioni di fasci neutri. Per il  
20 diagramma A, fasci neutri con potenza totale nell'intervallo di circa 2.5-  
2.9 MW erano stati iniettati nella FRC 450 per una lunghezza di  
pulsazione di fasci attivi di circa 6 ms. Il ciclo di vita diamagnetico di  
plasma raffigurato nel diagramma A era di circa 5.2 ms. Dati più recenti  
mostrano un ciclo di vita diamagnetico di plasma di circa 7.2 ms è  
25 raggiungibile con una lunghezza di pulsazione di fasci attivi di circa 7



ms.

Come notato sopra con riferimento alla Figura 16, la correlazione tra lunghezza di pulsazione di fasci e ciclo di vita della FRC non è perfetta quando l'intrappolamento di fasci diventa inefficiente al di sotto di una certa misura di plasma, ad esempio, quando la FRC 450 si riduce in quanto a dimensione fisica non tutti i fasci iniettati vengono intercettati e intrappolati. La riduzione o la decadenza della FRC è principalmente dovuta al fatto che la perdita netta di energia (- 4 MW attorno alla metà di tutto lo scarico) dal plasma di FRC durante lo scarico sia leggermente maggiore della potenza totale immessa nella FRC per mezzo dei fasci neutri (-2.5 MW) per la particolare impostazione sperimentale. Come notato in riferimento alla Figura 3C, l'iniezione angolata di fasci dalle pistole di fasci neutri 600 verso il piano mediano migliora l'accoppiamento fascio-plasma, anche quando il plasma di FRC si riduce o altrimenti si contrae assialmente durante il periodo di iniezione. In aggiunta, un'adeguata alimentazione a pellet manterrà la densità di plasma richiesta.

Il diagramma B è il risultato di una prova di simulazione che utilizza una lunghezza di pulsazione di fasci attivi di circa 6 ms e una potenza totale di fasci dalle pistole di fasci neutri 600 di poco più di circa 10 MW, in cui i fasci neutri dovrebbero iniettare neutri H (o D) con energia delle particelle di circa 15 keV. La corrente equivalente iniettata da ognuno dei fasci è di circa 110 A. Per il diagramma B, l'angolo di iniezione di fasci rispetto all'asse del dispositivo era di circa 20°, raggio target di 0.19 m. L'angolo di iniezione può essere cambiato



nell'intervallo tra  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$ . I fasci devono essere iniettati nella direzione co-corrente azimutale. La forza laterale netta così come la forza assiale netta dall'iniezione dell'impulso di fasci neutri dovrebbe essere minimizzata. Come con il diagramma A, neutri veloci (H) vengono  
5 iniettati dagli iniettori di fasci neutri 600 dal momento in cui le FRC di formazione nord e sud si uniscono nella camera di confinamento 100 in una FRC 450.

Le simulazioni che erano il fondamento per il diagramma B usano risolutori ad ingresso multidimensionale MHD per il plasma di  
10 fondo e l'equilibrio, risolutori pienamente cinetici basati a Monte Carlo per i componenti di fasci energetici e tutti i processi di diffusione, così come una serie di equazioni di trasporto accoppiate per tutte le specie di plasma per formare processi di perdita interattivi. I componenti di trasporto sono empiricamente calibrati e confrontati estensivamente  
15 con il riferimento di un database sperimentale.

Come mostrato dal diagramma B, il ciclo di vita diamagnetico dello stato stabile della FRC 450 sarà la lunghezza della pulsazione di fascio. Ad ogni modo, è importante notare che la correlazione principale mostrata dal diagramma B è che quando i fasci vengono disattivati il  
20 plasma o la FRC inizia a decadere in quel momento, ma non prima. La decadenza sarà simile a quello osservata negli scarichi che non sono sottoposti a fasci – probabilmente nell'ordine di 1 ms oltre il momento di disattivazione dei fasci – ed è semplicemente un riflesso del momento peculiare di decadenza del plasma determinato dai processi di perdita  
25 intrinseci.



Nonostante l'invenzione sia incline a varie modifiche, e forme alternative, esempi specifici di essa sono stati mostrati nei disegni e sono descritte in dettaglio qui. Dovrebbe essere inteso, tuttavia, che l'invenzione non è limitata a forme particolari o metodi descritti, ma al  
5 contrario, l'invenzione è per coprire tutte le modifiche, gli equivalenti e le alternative che rientrano nello scopo e nell'ambito delle rivendicazioni allegate.

Nelle descrizioni sopra, per motivi di spiegazione soltanto, è impiegata una terminologia specifica per provvedere una comprensione  
10 esaustiva della presente descrizione. Tuttavia, sarà evidente a chi è esperto del settore che questi dettagli specifici non sono necessari per esercitare gli insegnamenti della presente descrizione.

Le varie caratteristiche degli esempi rappresentativi e le rivendicazioni dipendenti possono essere combinate in modi che non  
15 sono specificamente ed esplicitamente enumerati in modo da provvedere forme di realizzazioni aggiuntive utili dei presenti insegnamenti. Inoltre si fa notare espressamente che tutti gli intervalli di valori o le indicazioni di gruppi di entità mostrano ogni possibile valore intermedio o entità intermedia con lo scopo di spiegazione originale, così come con  
20 lo scopo di restringere l'oggetto rivendicato.

I sistemi e i metodi per generare e mantenere un regime FRC HPF sono stati spiegati. Si intende che le forme di realizzazione descritte qui hanno un obiettivo di delucidazione e non devono essere considerate limitanti della materia soggetto della descrizione. Varie  
25 modifiche, utilizzi, sostituzioni, combinazioni, miglioramenti, metodi di



produzione senza staccarsi dall'ambito della presente invenzione saranno evidenti a una persona esperta del settore. Per esempio, il lettore dovrebbe capire che l'ordine e la combinazione di azioni del processo descritte qui sono meramente illustrative, se non altrimenti detto, e l'invenzione può essere eseguita usando azioni di processo differenti o aggiuntive, o una combinazione o una messa in ordine differente di azioni di processo. Come altro esempio, ogni caratteristica di una forma di realizzazione può essere mischiata e combinata con altre caratteristiche mostrate in altre forme di realizzazione.

5

10 Caratteristiche e processi noti a coloro che hanno competenze ordinarie possono similmente essere incorporate come desiderato. In aggiunta e ovviamente, le caratteristiche possono essere aggiunte o detratte come desiderato. Di seguito, l'invenzione non deve essere ristretta se non in virtù delle rivendicazioni allegate.

15

A handwritten signature in cursive script, reading "Lari Betti". The signature is written in dark ink and is positioned in the lower right quadrant of the page.

**RIVENDICAZIONI**

1. Metodo per generare e mantenere un campo magnetico con una configurazione a inversione di campo (FRC) all'interno di una camera di confinamento (100) di un sistema, il sistema  
5 comprendendo:

una prima e seconda sezione di formazione di FRC diametralmente opposte (200) accoppiate alla camera di confinamento (100),

un primo e un secondo divertore (300) accoppiati alla prima e  
10 alla seconda sezione di formazione (200),

una o più pluralità di pistole al plasma (350), uno o più elettrodi di polarizzazione e una prima e una seconda presa a specchio (440), in cui la pluralità di pistole al plasma (350) include una prima e una seconda pistola al plasma (350) assiale funzionalmente accoppiate  
15 al primo e al secondo divertore (300), alla prima e alla seconda sezione di formazione (200) e alla camera di confinamento (100), in cui uno o più degli elettrodi di polarizzazione sono posizionati all'interno di una o più delle camere di confinamento (100), della prima e della seconda sezione di formazione (200), e del primo e del secondo divertore (300), e  
20 in cui la prima e la seconda presa a specchio (440) sono posizionate fra la prima e la seconda sezione di formazione (200) e il primo e il secondo divertore (300),

un sistema getter (800) accoppiato alla camera di confinamento (100) e al primo e al secondo divertore (300),

25 una pluralità di iniettori di neutri per fusione (600, 615)



accoppiati alla camera di confinamento (100) adiacente al piano  
mediano della camera di confinamento e orientati per iniettare fasci di  
atomi neutri verso il piano mediano in corrispondenza di un angolo  
inferiore di circa  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$  alla normale all'asse longitudinale della  
5 camera di confinamento, e

un sistema magnetico (410) comprendente una pluralità di  
bobine quasi-CC (432, 434, 436 e 444) posizionate attorno alla camera  
di confinamento (100), alla prima e alla seconda sezione di formazione  
(200), e al primo e al secondo divertore (300), ad una prima e ad una  
10 seconda serie di bobine a specchio quasi-CC (432, 434, 436 e 444)  
posizionate tra la camera di confinamento (100) e la prima e la seconda  
sezione di formazione (200),

il metodo comprendendo i passi di:

formare una FRC attorno a un plasma nella camera di  
15 confinamento, in cui il plasma di FRC è in relazione distanziata con la  
parete della camera di confinamento, e

mantenere la FRC in corrispondenza di o intorno a un valore  
costante senza decadenza iniettando fasci di atomi neutri veloci da  
iniettori di fasci neutri nel plasma di FRC in corrispondenza di un  
20 angolo inferiore di circa  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$  alla normale all'asse longitudinale della  
camera di confinamento e verso il piano mediano della camera di  
confinamento.

2. Metodo della rivendicazione 1 comprendendo inoltre un  
passo tra generare un campo magnetico all'interno della camera con  
25 bobine quasi-CC che si estendono attorno alla camera, o generare un



campo magnetico all'interno della camera, della prima e della seconda sezione di formazione e dei divertori con bobine quasi-CC che si estendono attorno alla camera, alle sezioni di formazione e ai divertori.

3. Metodo delle rivendicazioni 1 e 2 comprendendo inoltre un  
5 passo tra generare un campo magnetico a specchio all'interno di  
estremità opposte della camera con bobine a specchio quasi-CC che si  
estendono attorno alle estremità opposte della camera, o generare un  
campo magnetico a specchio tra le sezioni di formazione e i divertori con  
bobine a specchio quasi-CC, o generare un campo magnetico di presa a  
10 specchio all'interno di un restringimento tra le sezioni di formazione e i  
divertori con bobine di presa a specchio quasi-CC che si estendono  
attorno al restringimento tra le sezioni di formazione e i divertori.

4. Metodo delle rivendicazioni da 1 a 3 in cui il passo di  
formare la FRC ne include uno tra formare una FRC di formazione nella  
15 prima sezione di formazione accoppiata ad un'estremità della camera di  
confinamento e accelerare la FRC di formazione verso il piano mediano  
della camera per formare la FRC o formare prima e seconda FRC di  
formazione in prima e seconda sezione di formazione a estremità  
opposte della camera di confinamento e accelerare la prima e la seconda  
20 FRC di formazione verso il piano mediano della camera in cui le due  
FRC di formazione si uniscono per formare la FRC, o in cui il passo di  
formare la FRC ne include uno tra formare una FRC di formazione  
mentre si accelera la FRC di formazione verso il piano mediano della  
camera e formare una FRC di formazione poi accelerare la FRC di  
25 formazione verso il piano mediano della camera.



5. Metodo della rivendicazione 4 comprendendo inoltre il passo di guidare superfici di flusso magnetico della FRC in un divertore accoppiato all'estremità della prima sezione di formazione o guidare superfici di flusso magnetico della FRC in divertori accoppiati alle  
5 estremità della prima e della seconda sezione di formazione.

6. Metodo delle rivendicazioni da 1 a 5 comprendendo inoltre un passo tra condizionare le superfici interne della camera, le sezioni di formazione e i divertori con il sistema getter o condizionare le superfici interne della camera, le sezioni di formazione, e i divertori con  
10 il sistema getter, in cui il sistema getter include un sistema di deposizione di Titanio e un sistema di deposizione di Litio.

7. Metodo delle rivendicazioni da 1 a 6 comprendendo inoltre il passo di iniettare assialmente plasma nella FRC dalle pistole al plasma montate assialmente.

15 8. Metodo delle rivendicazioni da 1 a 7 comprendendo inoltre un passo tra controllare il profilo radiale del campo elettrico in uno strato di bordo della FRC con gli elettrodi di polarizzazione o controllare il profilo radiale di campo elettrico in uno strato di bordo della FRC applicando una distribuzione di potenziale elettrico a un  
20 gruppo di superfici a flusso aperto della FRC con elettrodi di polarizzazione.

9. Metodo delle rivendicazioni da 1 a 8, in cui il sistema include inoltre uno o più di:

due o più bobine di sella accoppiate alla camera di  
25 confinamento e, un iniettore di pellet di ioni accoppiato alla camera di



confinamento.

10. Metodo della rivendicazione 9 in cui il passo di mantenere la FRC comprendendo inoltre il passo di iniettare pellet di atomi neutri dall'iniettore di pellet nella FRC.

5 11. Metodo della rivendicazione 10 comprendendo inoltre il passo di generare un campo di dipolo magnetico e un campo di quadrupolo magnetico all'interno della camera con le bobine di sella accoppiate alla camera, e

10 12. Metodo delle rivendicazioni 1-11 in cui il passo di mantenere la FRC in corrispondenza di o intorno a un valore costante senza decadenza iniettando fasci di atomi neutri veloci include mantenere la FRC in corrispondenza di o intorno a un valore costante senza decadenza mentre fasci di atomi neutri vengono iniettati nella FRC.

15 13. Metodo delle rivendicazioni 1-11 in cui la sezione di formazione comprende sistemi di formazione modularizzati per generare una FRC e trasferirla verso un piano mediano della camera di confinamento.

20 14. Metodo della rivendicazione 13 in cui i sistemi di formazione comprendono un sistema formazione di potenza pulsata, o una pluralità di unità di potenza e controllo accoppiate a quelli individuali di una pluralità di insiemi di piattine per energizzare una serie di bobine di quelli individuali di una pluralità di insiemi di piattine  
25 avvolti attorno al tubo allungato della prima e della seconda sezione di formazione, o una pluralità di unità di potenza e controllo accoppiate a



quelli individuali di una pluralità di insiemi di piattine per energizzare una serie di bobine di quelli individuali della pluralità di insiemi di piattine avvolti attorno al tubo allungato della prima e della seconda sezione di formazione, in cui quelle individuali della pluralità di unità di  
5 potenza e controllo comprendendo un sistema di innesco e controllo, o una pluralità di unità di potenza e controllo accoppiate a quelli individuali di una pluralità di insiemi di piattine per energizzare una serie di bobine di quelli individuali della pluralità di insiemi di piattine avvolti attorno al tubo allungato della prima e della seconda sezione di  
10 formazione, in cui quelle individuali della pluralità di unità di potenza e controllo comprendendo un sistema di innesco e controllo, in cui i sistemi di innesco e controllo di quelle individuali della pluralità di unità di potenza e controllo essendo sincronizzabili per permettere formazione di FRC statica in cui la FRC viene formata e poi iniettata o  
15 formazione di FRC dinamica in cui la FRC viene formata e traslata simultaneamente.

15. Metodo delle rivendicazioni 1-11 in cui gli elettrodi di polarizzazione includono uno o più elettrodi a punto posizionati all'interno della camera di contenimento per entrare in contatto con  
20 linee di campo aperte, una serie di elettrodi anulari tra la camera di confinamento e la prima e la seconda sezione di formazione per caricare strati di flusso di bordo estremo in una maniera simmetrica azimutale, una pluralità di elettrodi impilati concentricamente posizionati nel primo e nel secondo divertore per caricare molteplici strati di flusso  
25 concentrici, e anodi delle pistole al plasma per intercettare un flusso



**HMC077ESM**

aperto.

\* \* \* \* \*

*Per traduzione conforme all'originale.*

A handwritten signature in cursive script, reading "Mari Betti". The signature is written in dark ink and is positioned to the right of the text "Per traduzione conforme all'originale."

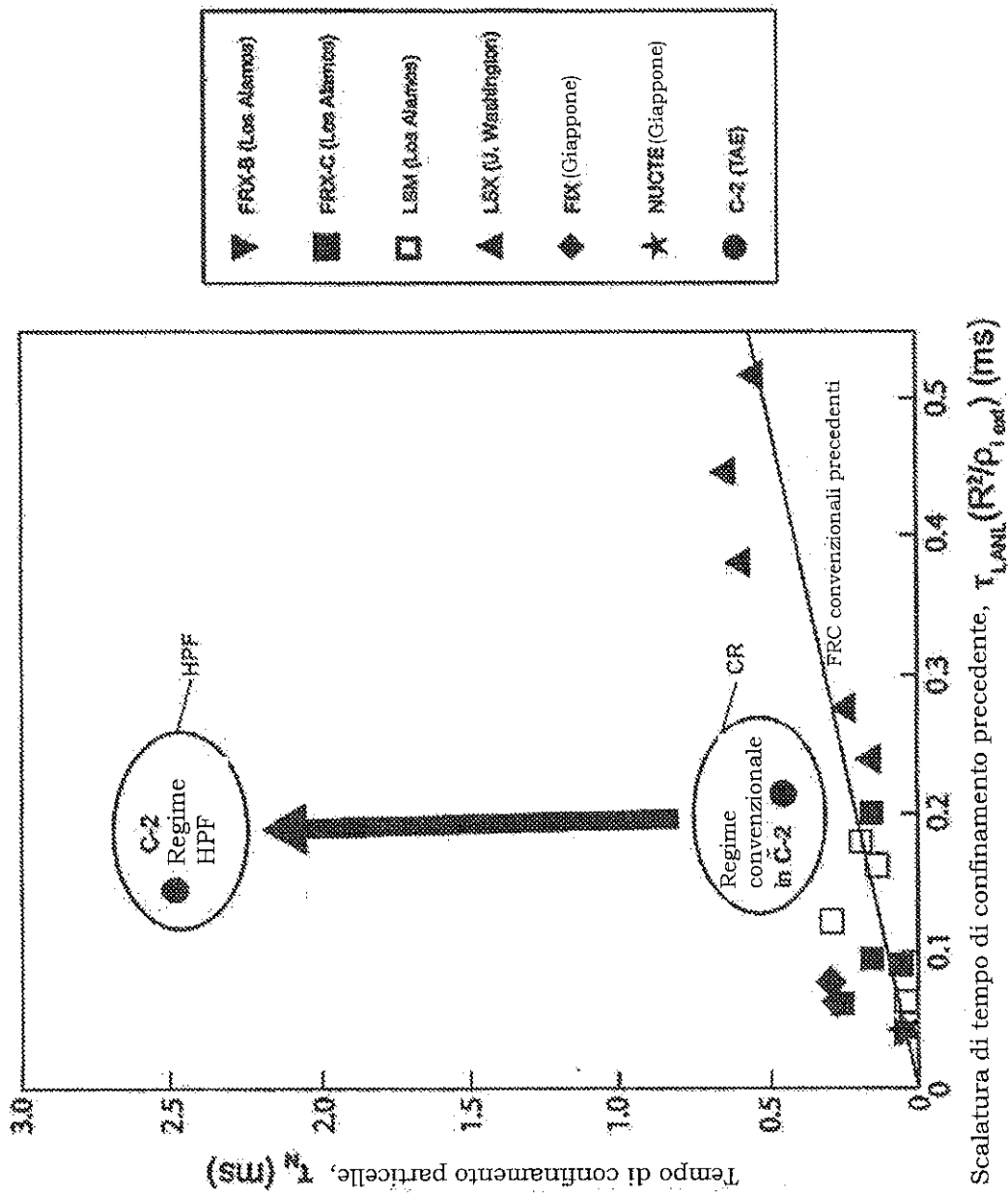


FIGURA 1

*Carli Soffi*



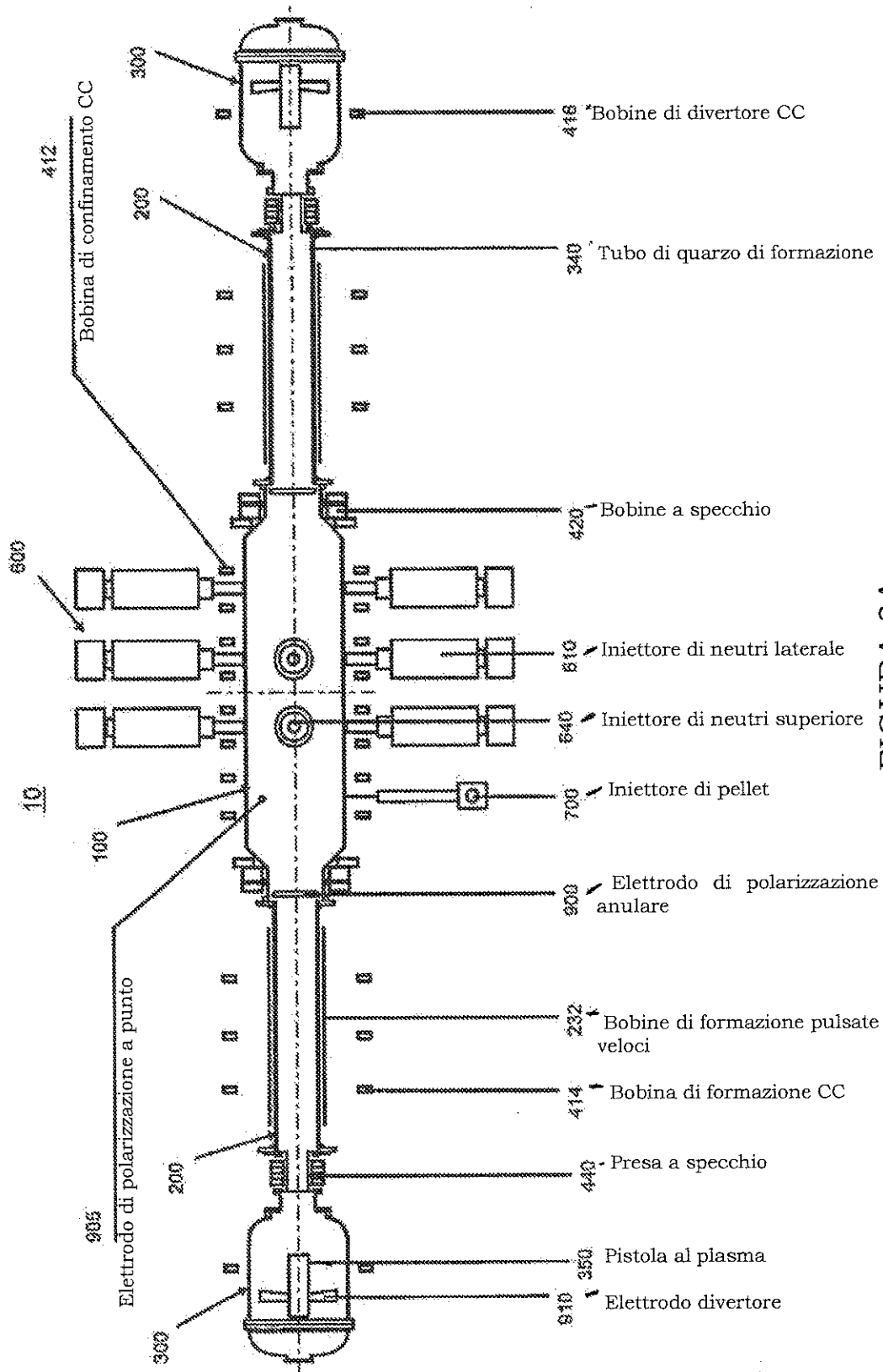
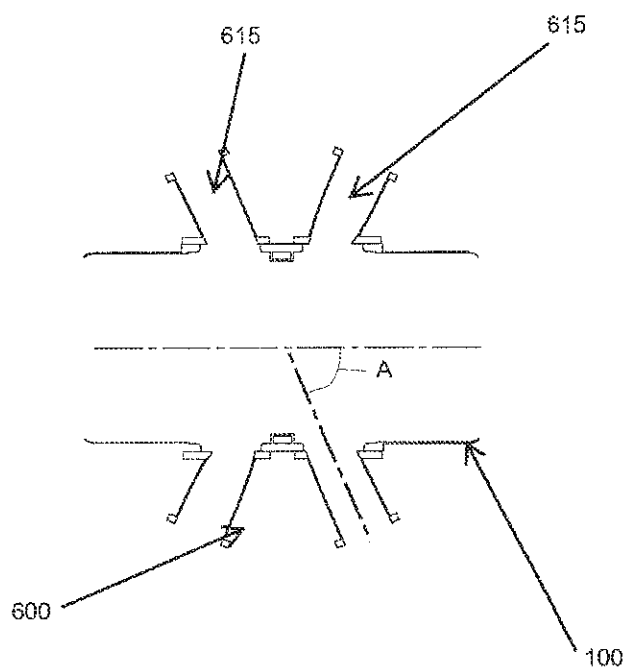
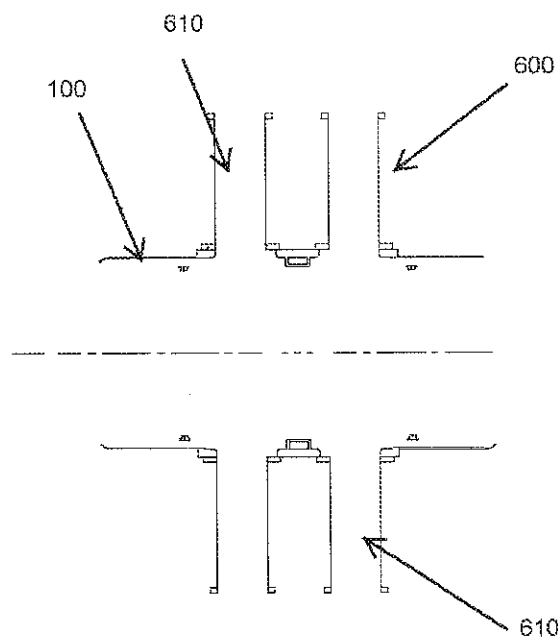


FIGURA 3A

*Carlo Belli*



*Carli Boiti*

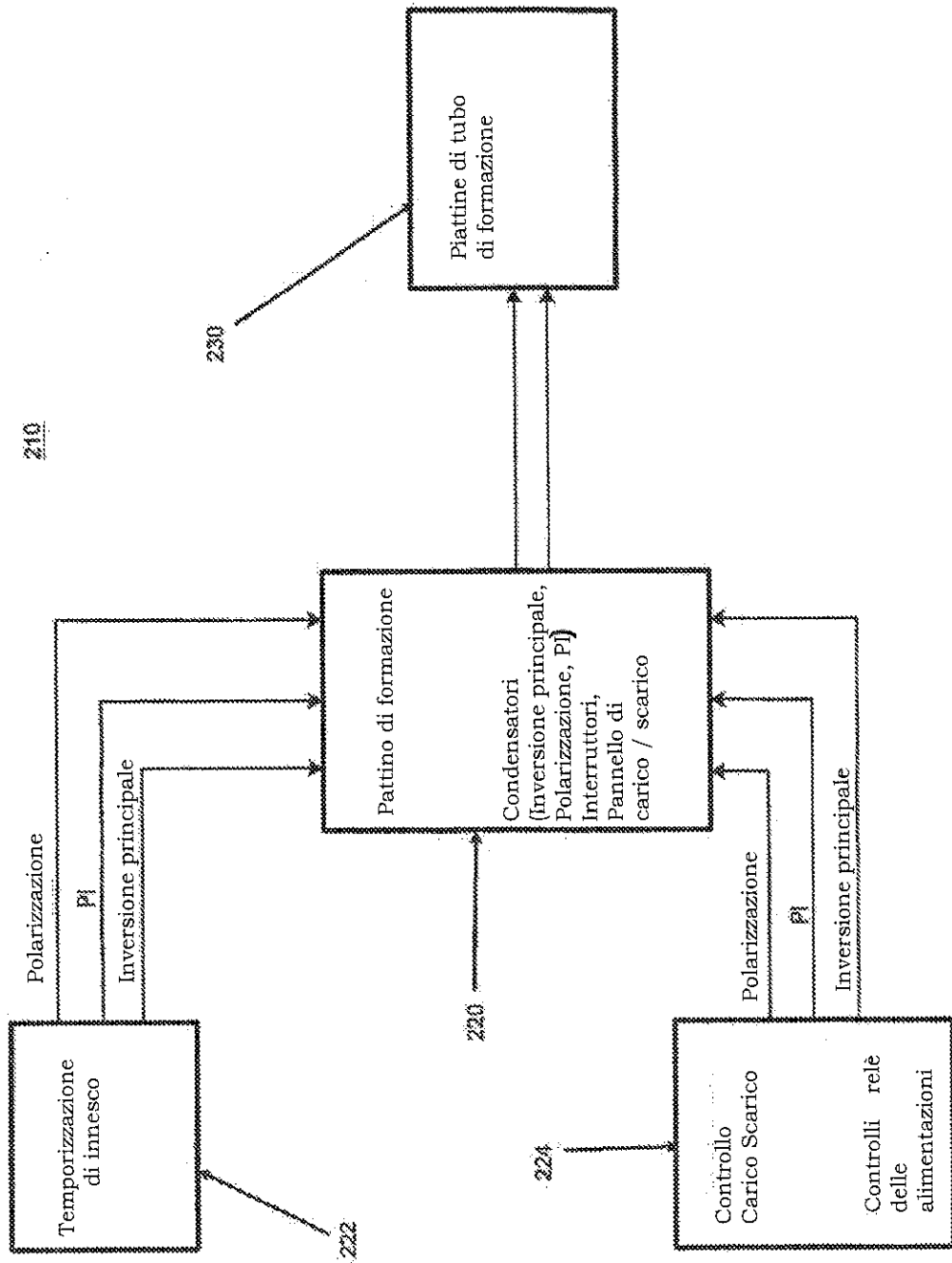


FIGURA 4

*Carlo Botti*

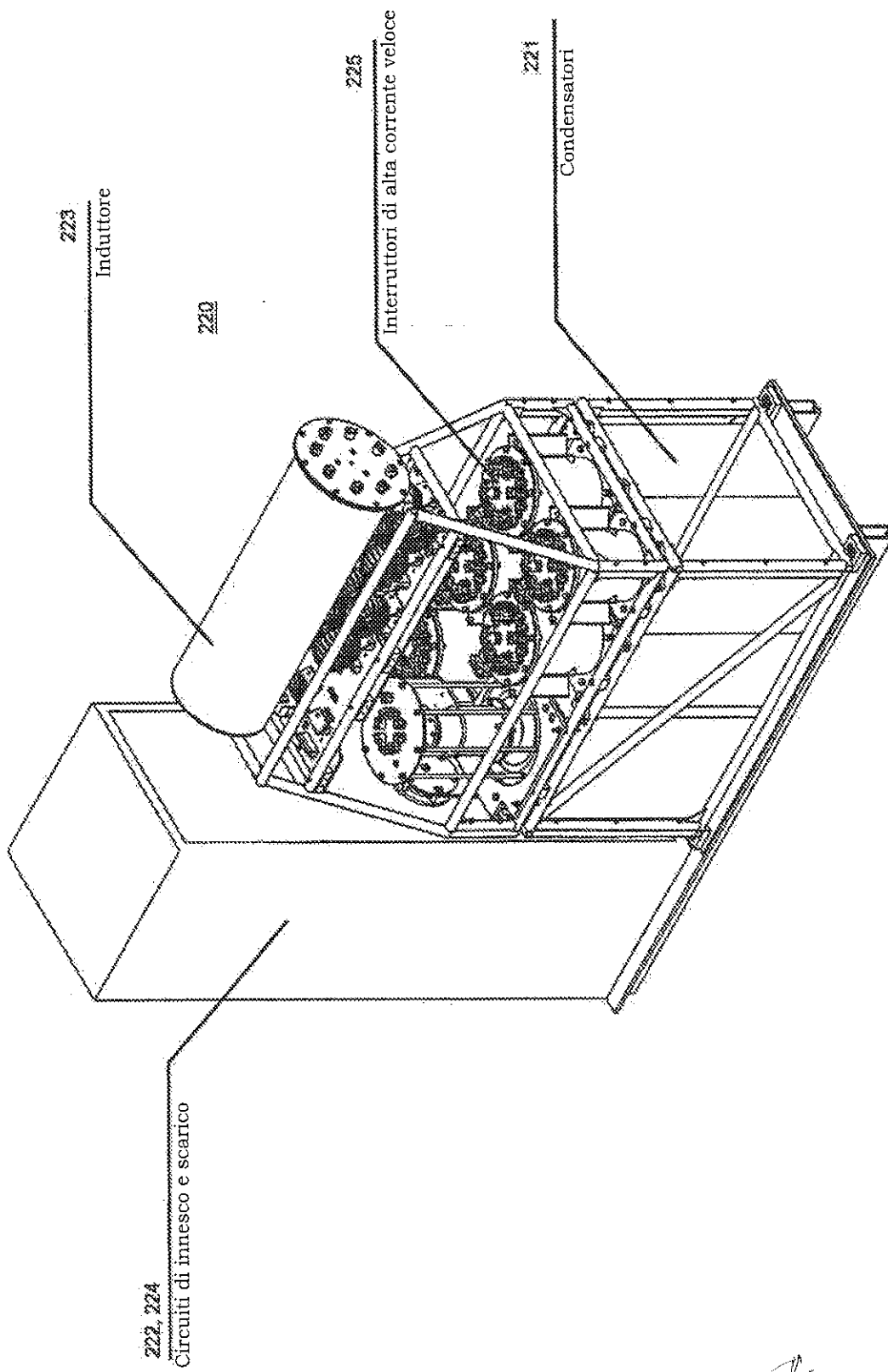


FIGURA 5

*Carlo Sotti*

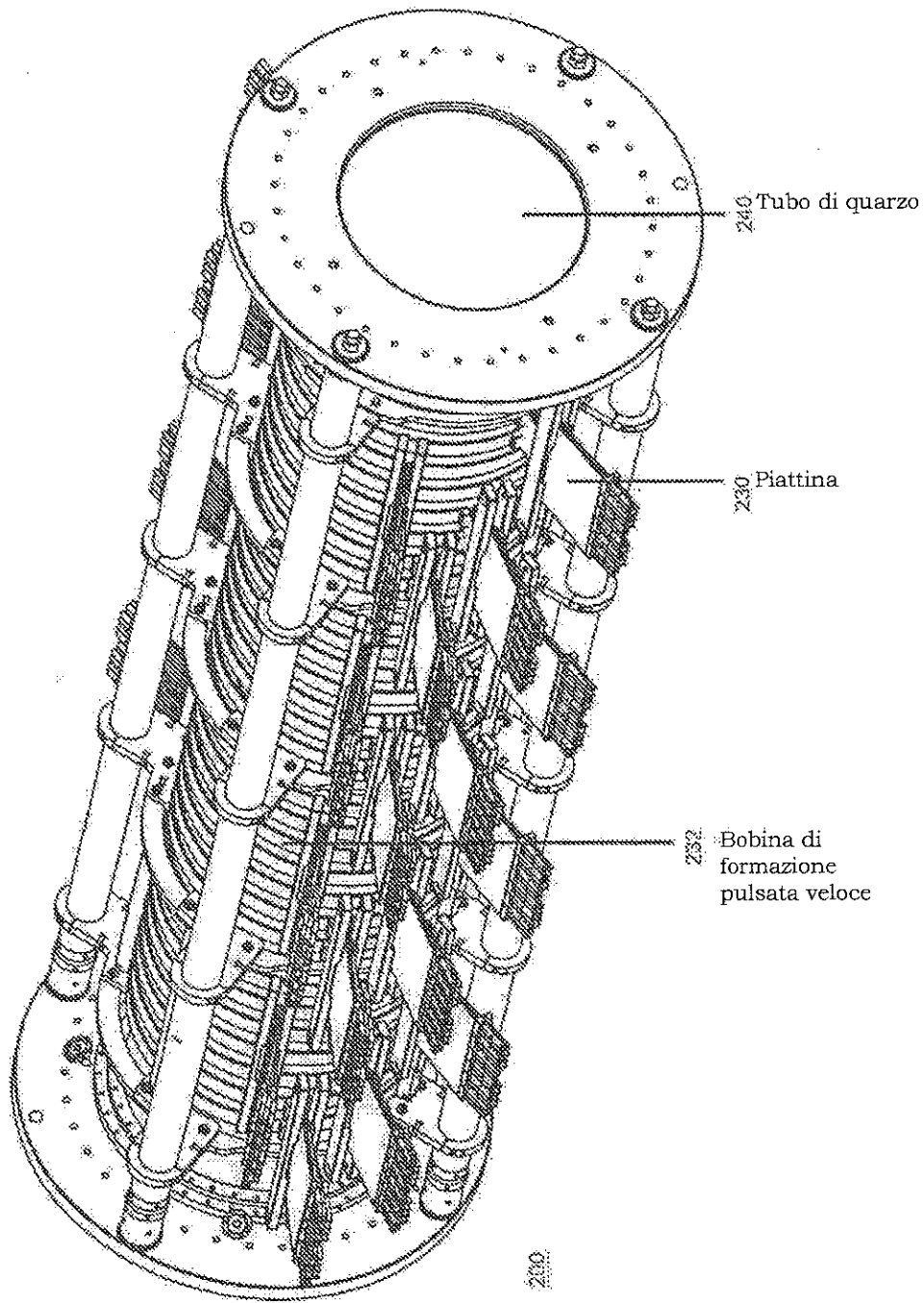


FIGURA 6

*Carlo Betti*

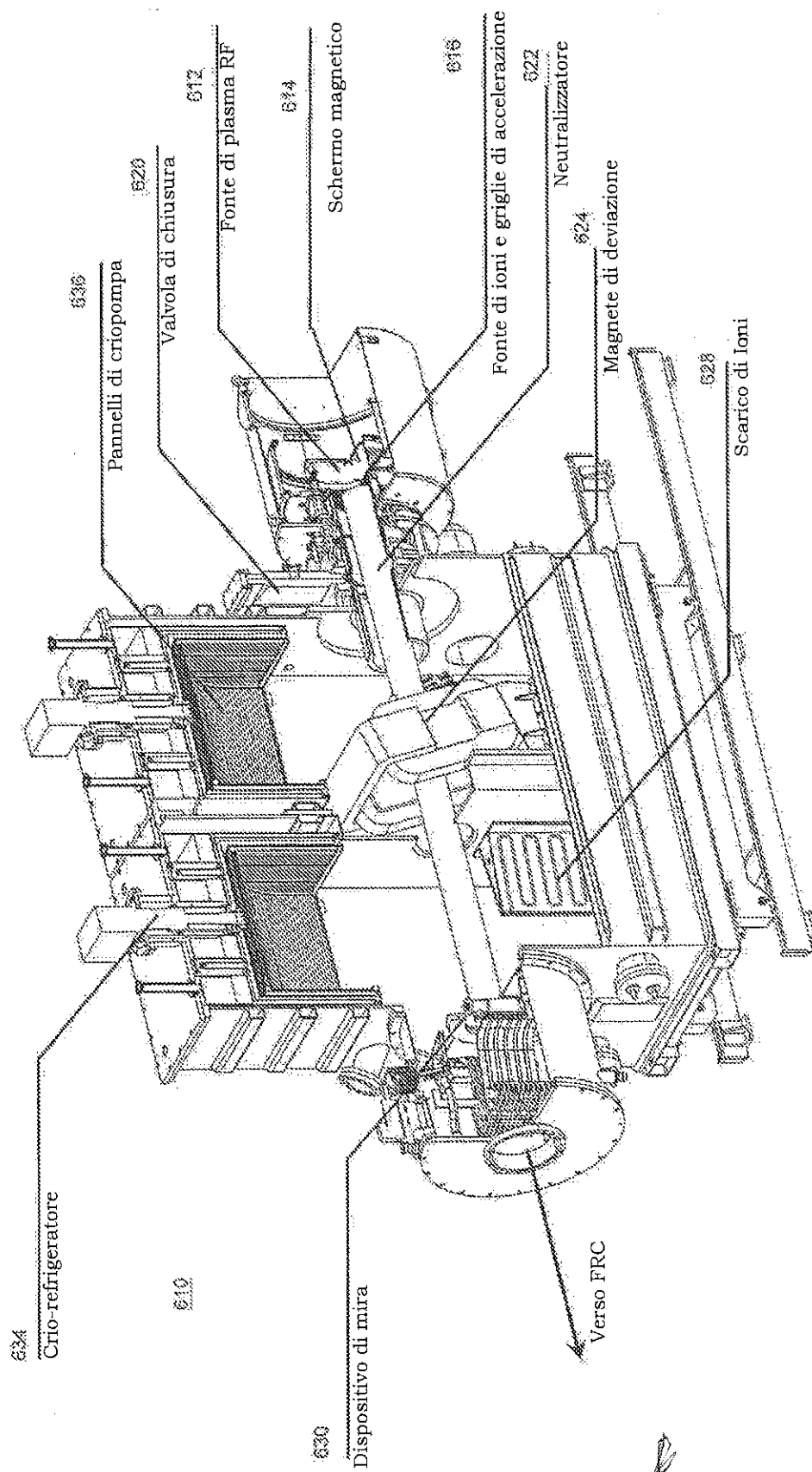


FIGURA 7

*Carlo Botti*

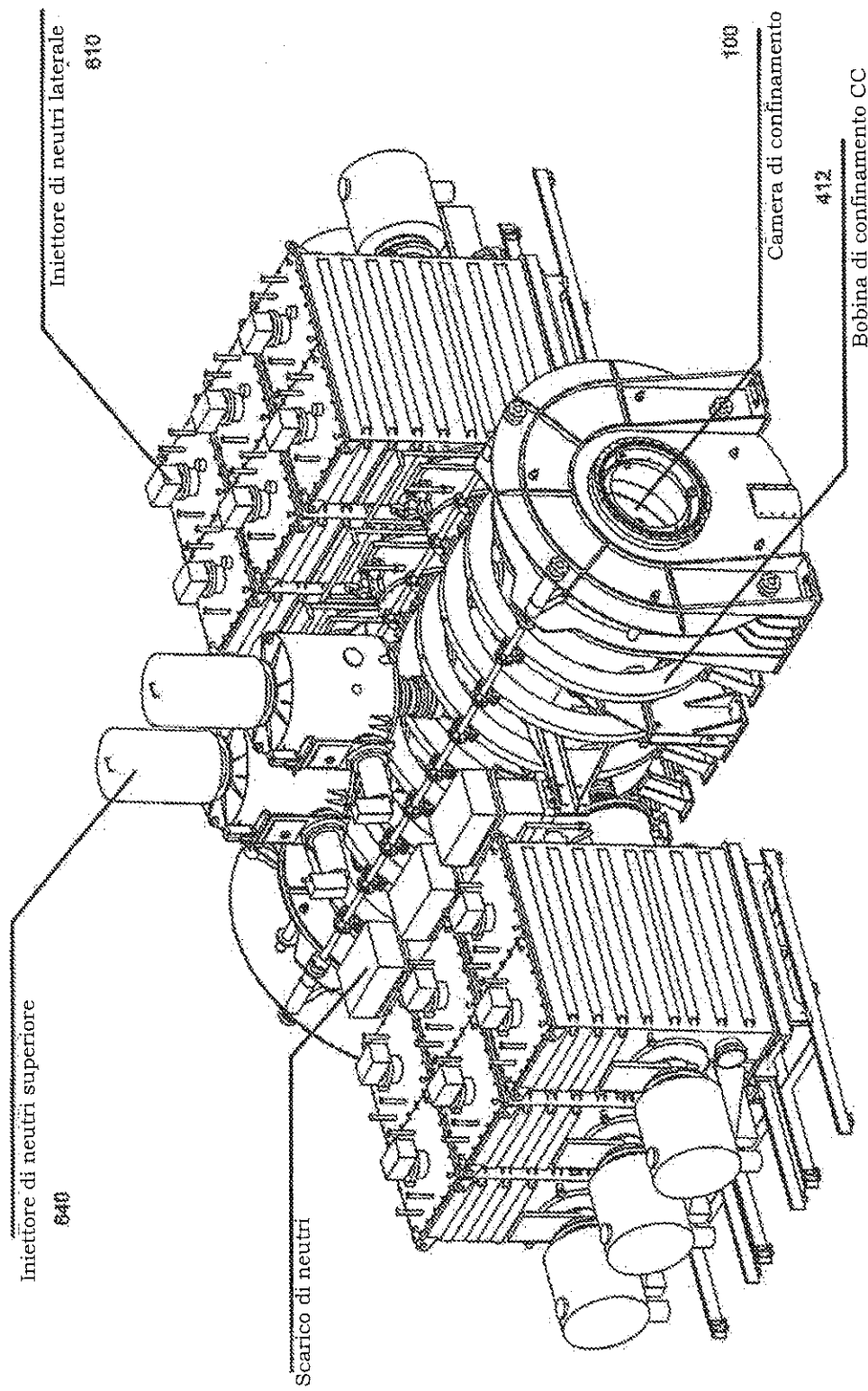


FIGURA 8

*Luigi Bolli*

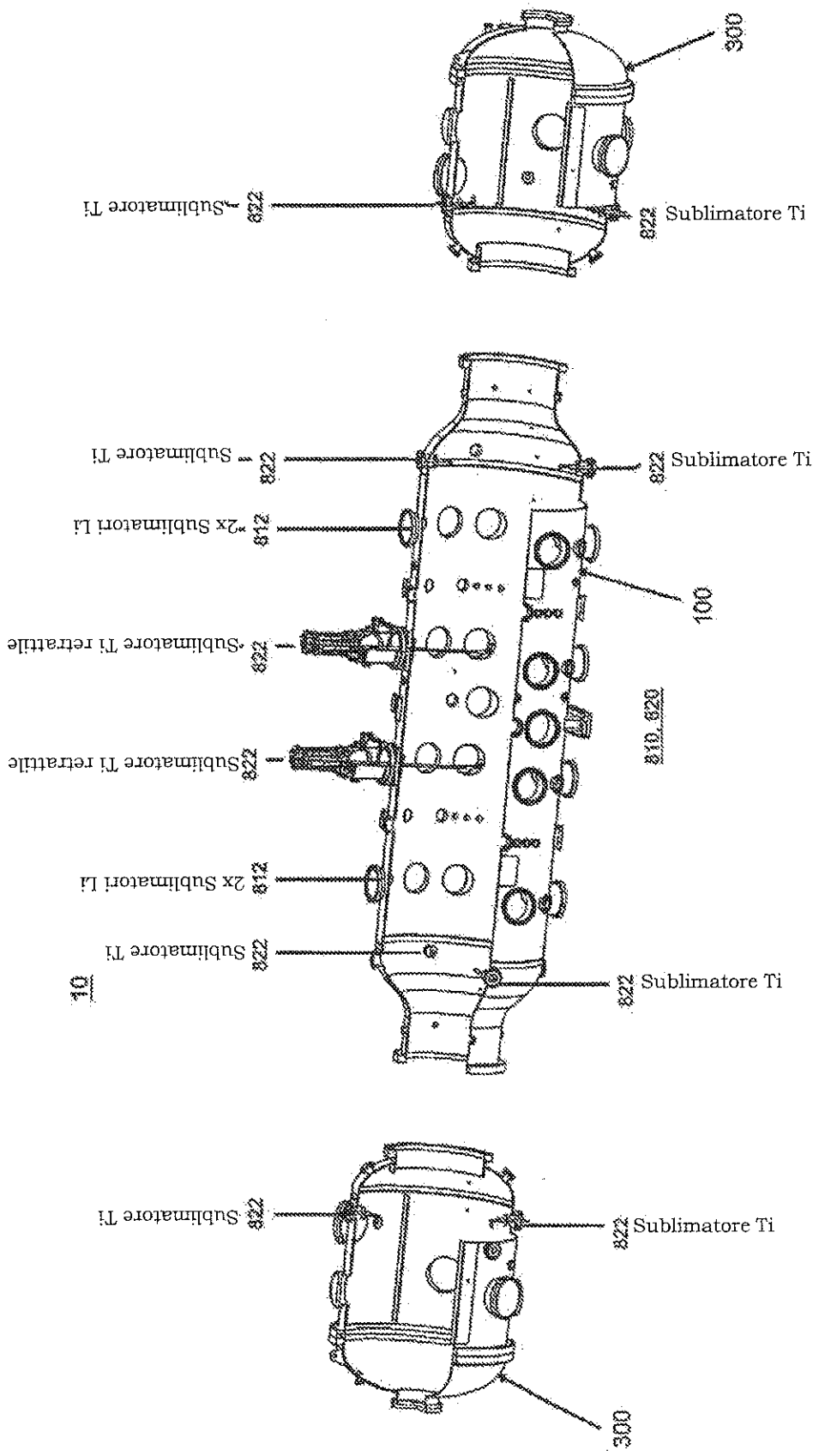


FIGURA 9

*Carli Belli*

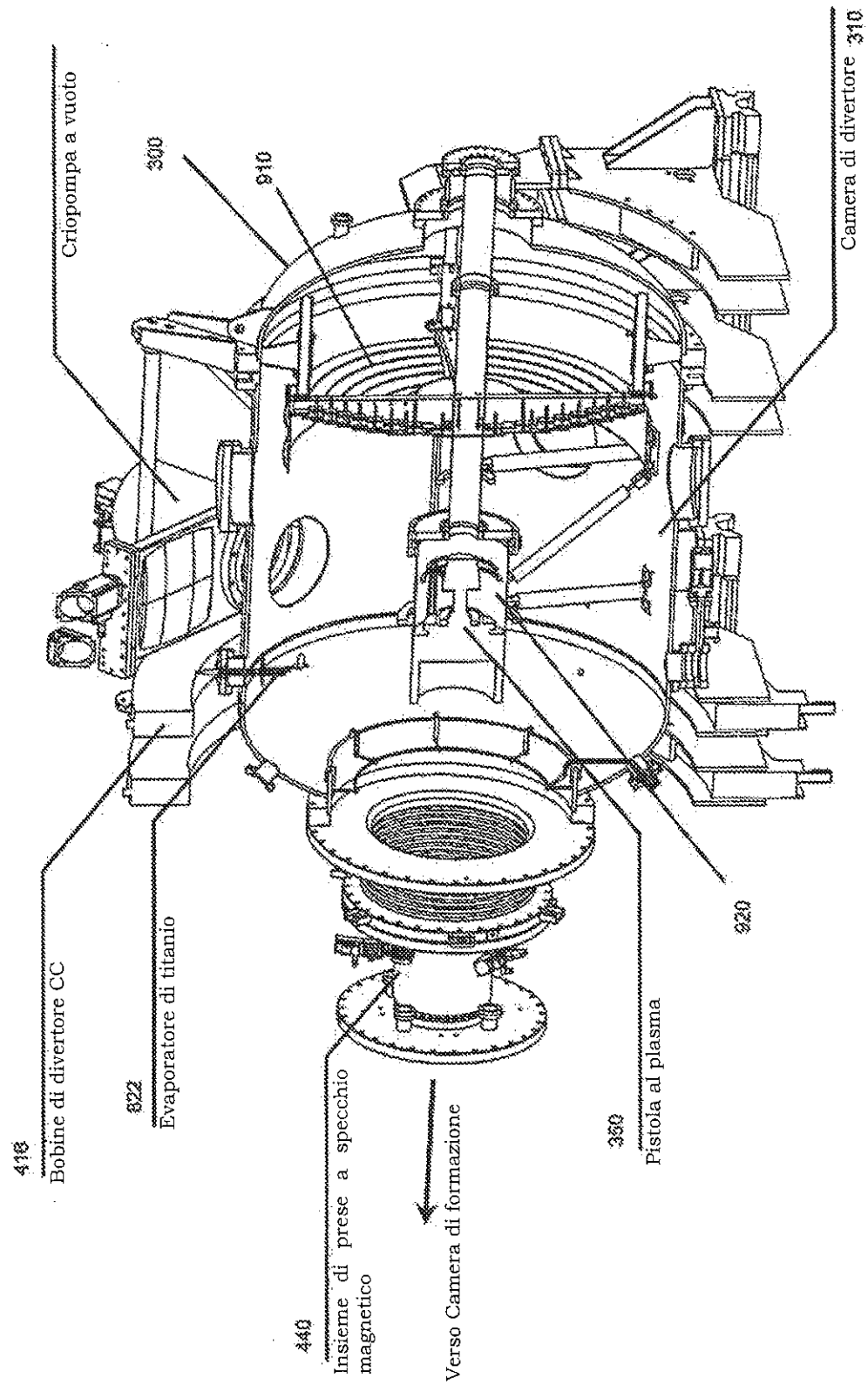


FIGURA 10

*Carichetti*

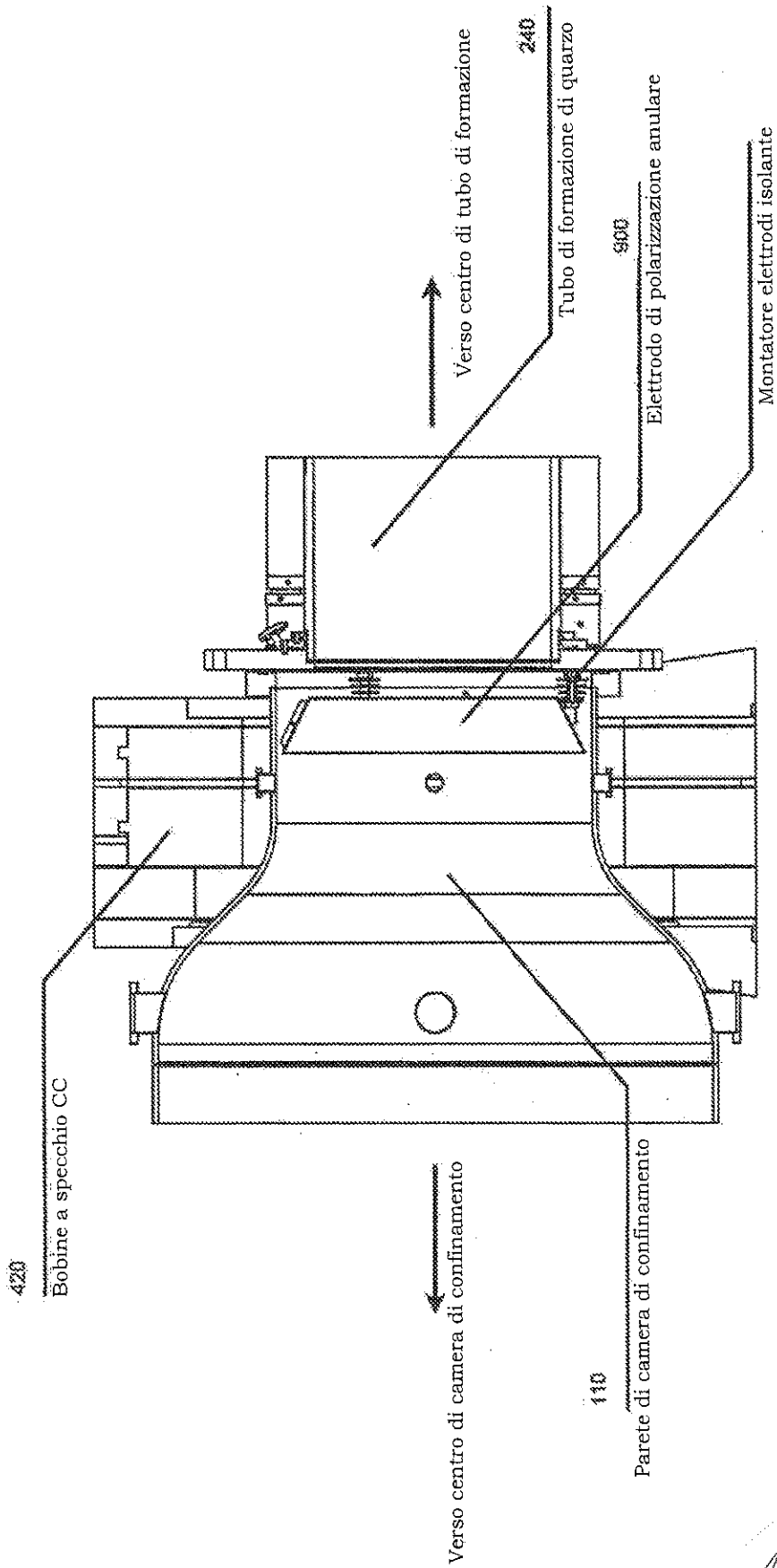


FIGURA 11

*Carlo Belli*

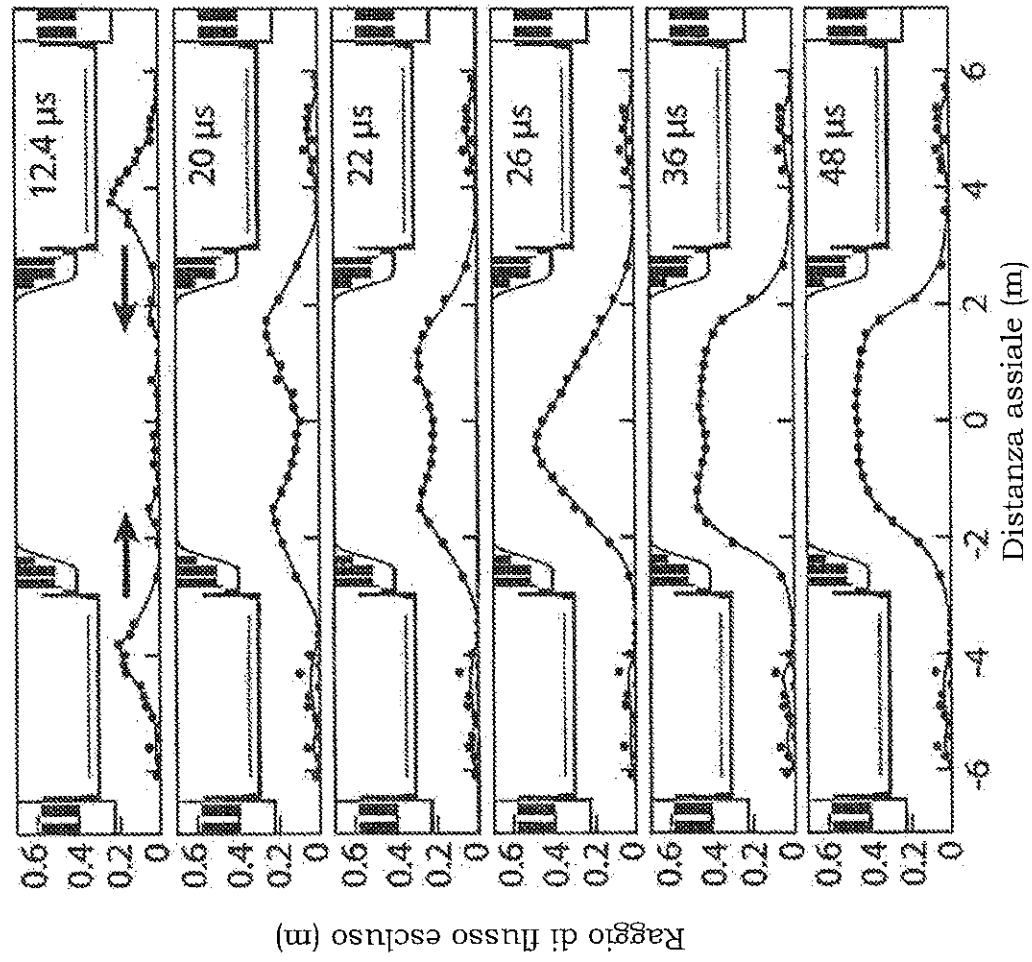


FIGURA 12

*Lari Boffi*

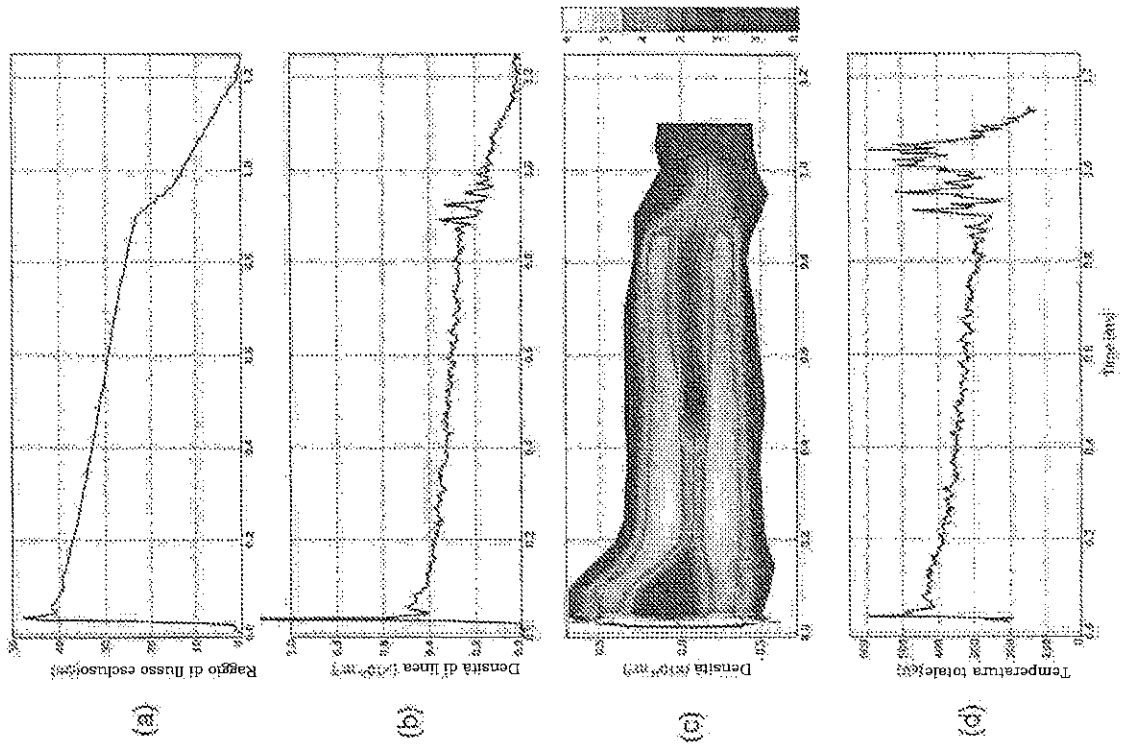
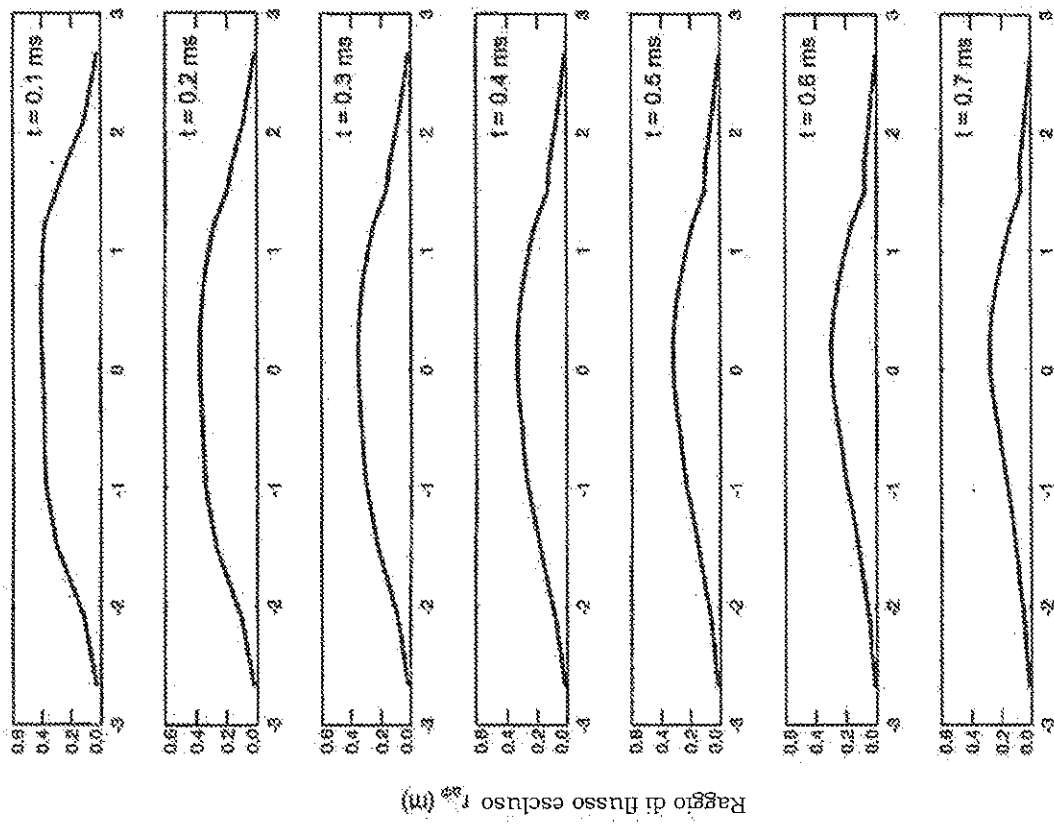


FIGURA 13

*Carlo Boffi*



Posizione assiale,  $z$  (m)

FIGURA 14

*Pari Betti*

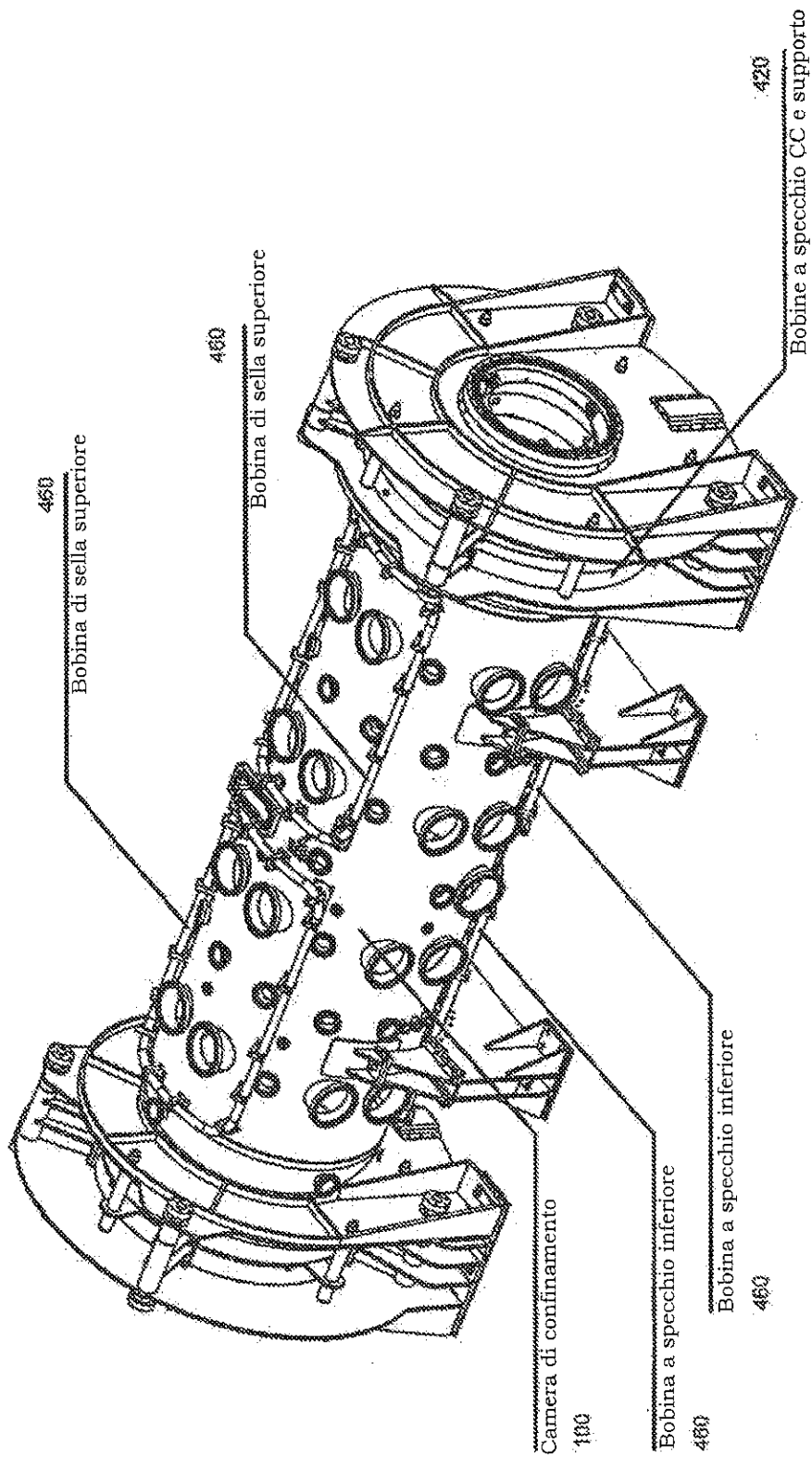


FIGURA 15

*Lari Betti*

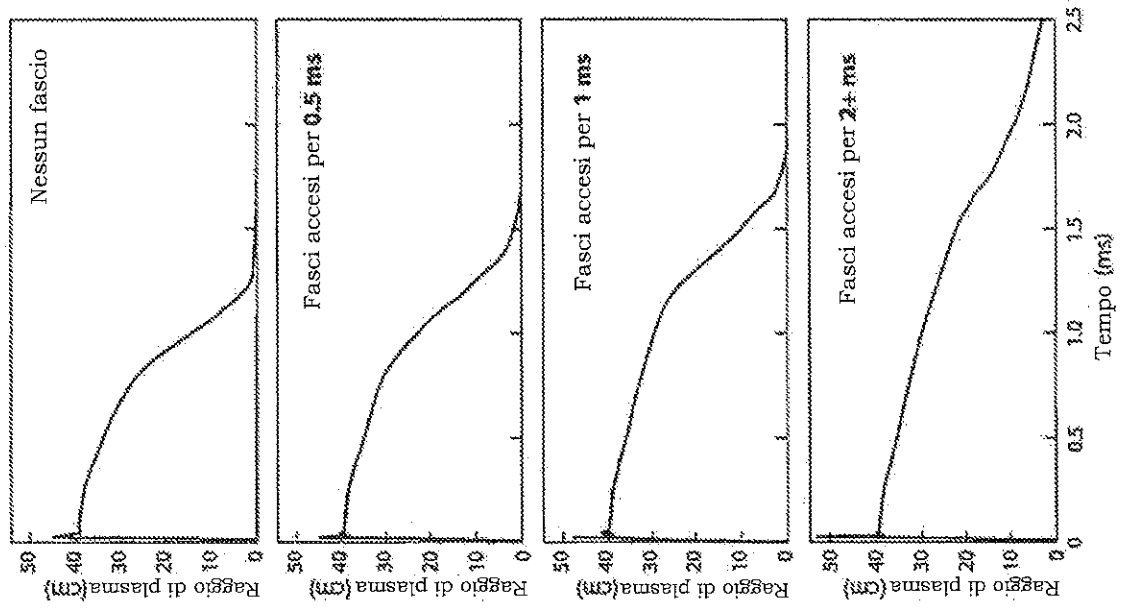


FIGURA 16

*Luigi Bolli*

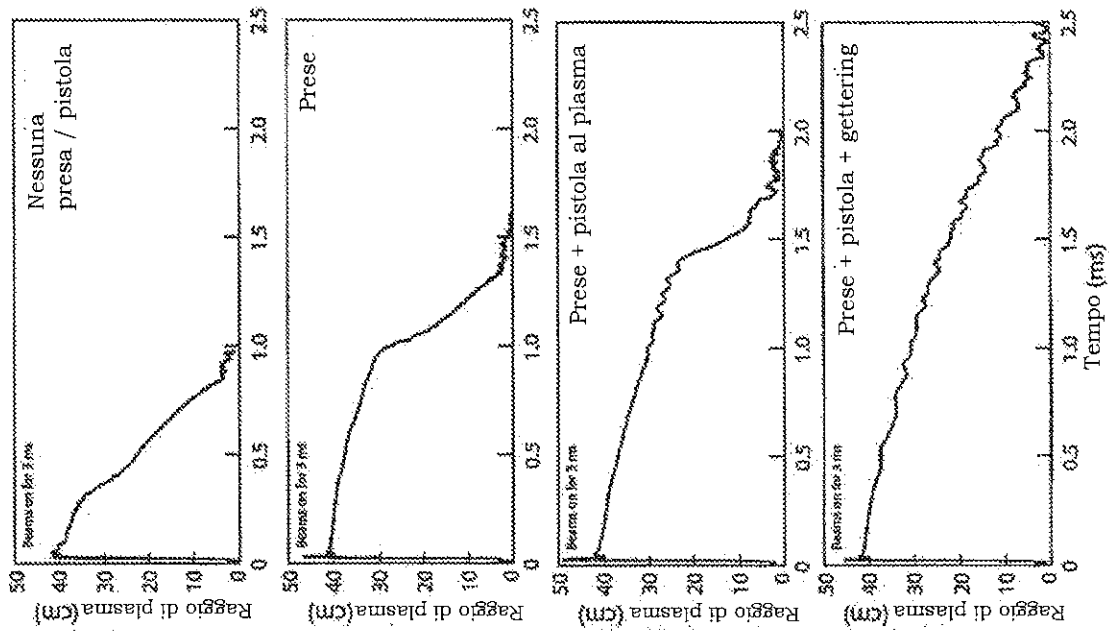


FIGURA 17

*Carlo Betti*

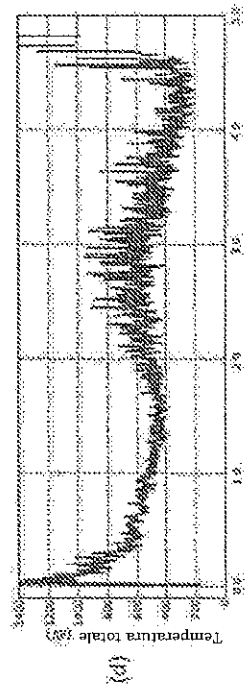
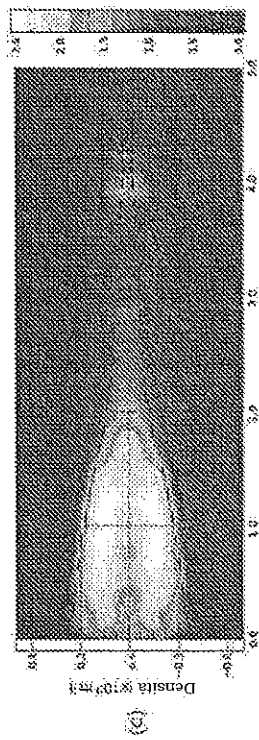
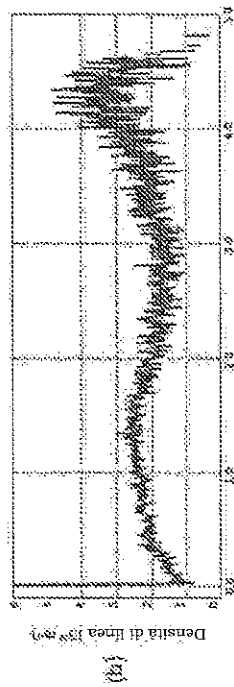
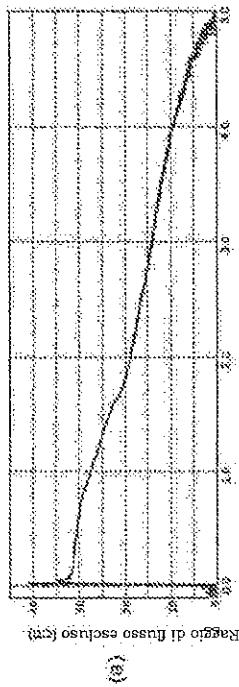


FIGURA 18

*Paolo Belli*

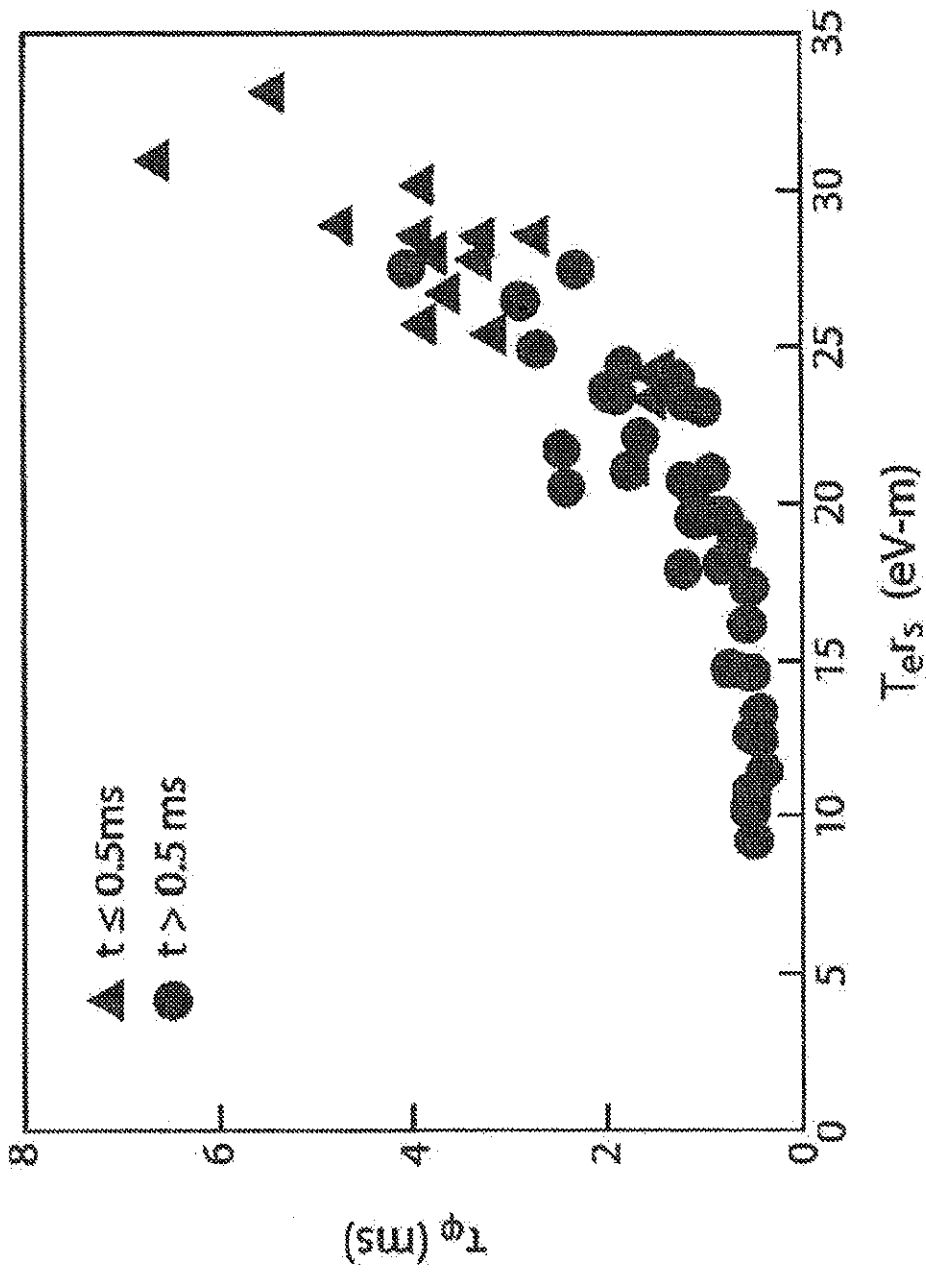


FIGURA 19

*Lari Boffi*

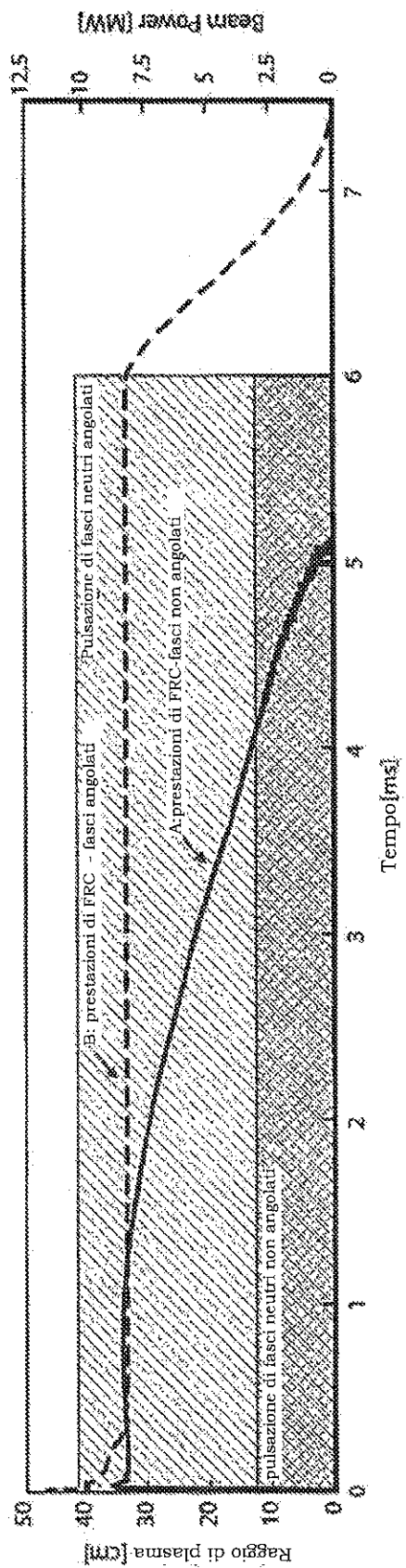


FIGURA 20

*Luigi Belli*