

بررسی اندرکنش پلاسما-دیواره اولیه در راکتورهای گداخت گرما هسته‌ای با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی

دنا

رضا امراللهیⁱ؛ مرتضی حبیبیⁱⁱ؛ محمد فرهیⁱⁱⁱ

چکیده

دستگاه پلاسمای کانونی دنا از نوع فیلیپوف (90 kJ, 25 kV, 288 μf) بوده و محدود کننده این دستگاه بر روی کاتد آن نصب شده است. در این مقاله، پدیده‌های لایه ذوب و حرکت این لایه، درخشندگی سطحی و حباب زایی در اثر واکنش پلاسمای D_2 ، $D_2 + \%2Kr$ و Ar با محدودکننده‌های دستگاه پلاسمای کانونی دنا بررسی شده است. این پدیده‌ها از مهم‌ترین عوامل تخریب دیواره اولیه در راکتورهای نیروگاه گداخت گرما هسته‌ای محسوب می‌شوند و پالس‌های متنوعی که از دستگاه پلاسمای کانونی گسیل می‌شود، امکان این مطالعات را فراهم می‌آورد. محدودکننده تحت تنش پرتوهای یونی، الکترونی، اشعه X و نوترون قبل و پس از تخریب پینچ در اثر ناپایداری مد $m=0$ قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی

پلاسمای کانونی، برهم کنش پلاسما-دیواره اولیه، لایه ذوب، درخشندگی سطحی، حباب زایی، اشعه X، یون‌های سریع، نوترون

Investigation of Plasma-First Wall Interaction in Thermonuclear Reactors by DENA Plasma Focus Facility

R. Amrollahi; M. Habibi; M. Farrahi

ABSTRACT

DENA is a Filippov type plasma focus facility (90kJ, 25kV, 288μf). In this paper we investigate high power pulses of dense Plasma-Aluminum limiters interaction in DENA plasma focus. The working gases for these experiments were D_2 , Ar and $D_2 + \%2Kr$. Aluminum limiters is above of DENA chamber and is irradiated by fast ions, relativistic electrons, and neutrons, as well as soft and hard X-ray after the current disruption (after and before $m=0$ instability). We used SEM techniques for analyzing irradiated samples. Interaction of intense plasma streams with samples and D_2 gas in DENA results the formation of a melt layer motion and bubbling effect respectively.

KEYWORDS

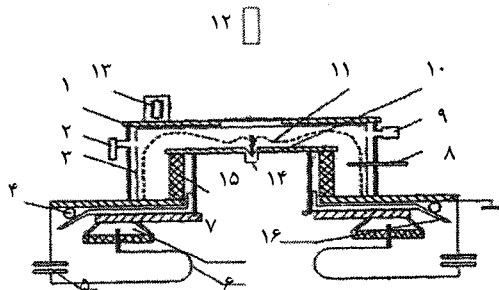
DENA Plasma Focus; Plasma-Wall Interaction; Bubbling effect; Melt layer motion; Surface smoothing; X-rays; Fast ions; Neutrons

ⁱ استاد و رئیس دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: amrollahi@aut.ac.ir

ⁱⁱ دانشجوی دوره دکتری مهندسی هسته ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: mortezahabibi@aut.ac.ir

ⁱⁱⁱ پژوهشگر پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران

در این مقاله، برخی از اثرات اندرکنش پالس پلاسمای دستگاه دنا با محدودکننده‌ها پس از تخریب پینچ چگال مطالعه شده‌اند. نتایج این بررسی‌ها ضمن اینکه در تکمیل طراحی دستگاه‌های قدرت گداخت هسته‌ای (از قبیل ITER) استفاده می‌شود، موجب پیشبرد پژوهش‌های مرتبط با اثرات پلاσμα بر مواد ساختاری سیستم‌های مختلف خواهد شد.



شکل (۱): شمایی از دستگاه پلاسمای کانونی دنا

(اجزای این دستگاه در زیر معرفی شده‌اند)

- ۱- پوشش بالایی محفظه تخلیه، ۲- دوربین روزنه سوزنی، ۳- پوشاننده داخلی محفظه، ۴- پیچه روگوفسکی، ۵- بانک خازنی، ۶- همسازکننده القاییدی، ۷- صفحه جمع‌کننده، ۸- پروب مغناطیسی، ۹- شمارنده SXR، ۱۰- آند، ۱۱- پوسته جریان پلاσμα، ۱۲- دیود خلاء با ستیل‌تور NaI، ۱۳- شمارنده نوترون، ۱۴- آند قابل تعویض، ۱۵- عایق، ۱۶- اسپارک کپ

۲- مراحل تجربی

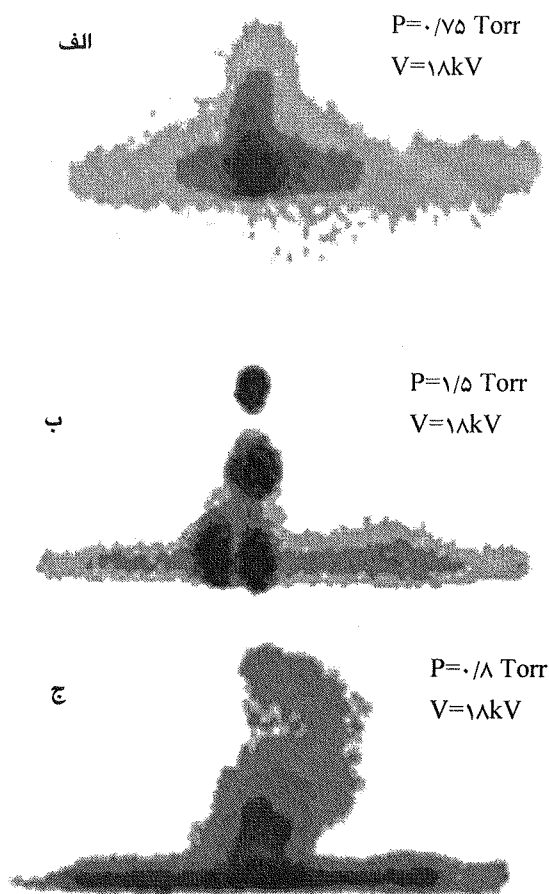
در این مقاله، اثر پلاسمای حاصل از گازهای D_2 با ۱۱۰ پالس، ۲% $2Kr + D_2$ با ۲۰۰ پالس و Ar با ۱۱۱ پالس را بر روی محدودکننده قابل تعویض این دستگاه بررسی کرده‌ایم. در بررسی اثر اشعه‌ها (باریکه‌های یونی و الکترونی، اشعه X نرم و سخت و در صورت استفاده از دوتریم، نوترون) بر روی سطح محدودکننده از تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده کرده‌ایم. در شکل (۲) محدودکننده‌ها پس از تنش پلاسمایی و در شکل (۳) تصویرهای طیف اشعه X نرم به دست آمده توسط دوربین روزنه سوزنی مشاهده می‌شوند. سه مکانیسم (گذار آزاد-آزاد، گذار آزاد-مقید و گذار مقید-مقید) درگسیل اشعه X از دستگاه پلاسمای کانونی دخالت دارند. برطبق رابطه $\lambda_{max} = \frac{1240}{kT_e}$ (A) برای تابش ترمزی، اگر دمای الکترون در درون ستون پلاسمای کانونی را $T_e = 1keV$ در نظر بگیریم، پیک طیف پیوسته اشعه X در طول موج $\lambda_{max} = 1/12(A)$ بدست می‌آید که طیف با این انرژی در محدوده اشعه ایکس نرم قرار دارد (شکل (۳)). مهم‌ترین عامل

دستگاه پلاسمای کانونی (DPF) با آرایش میدان مغناطیسی انتهای باز و عملکرد پالسی، پلاسمایی تا چگالی $10^{19}/cm^3$ و دمای چند KeV تولید می‌کند که حدود ۱۵۰ ns-۱۰۰ محصور می‌شود. در شکل (۱) طرح کلی از این دستگاه نشان داده شده است. پس از اعمال اختلاف پتانسیل زیاد بین آند و کاتد دستگاه و تخلیه الکتریکی بین الکترودهای آن یک لایه جریان تشکیل می‌شود که میدان مغناطیسی حاصل در اثر نیروی لورنتس آن را به سمت بالا هدایت می‌کند. لایه جریان گاز مورد استفاده در دستگاه را یونیزه می‌کند و وقتی این لایه به انتهای الکترود مرکزی می‌رسد، به سمت محور دستگاه چگالیده و ستونی از پلاسمای داغ و چگال در این ناحیه تشکیل می‌شود.

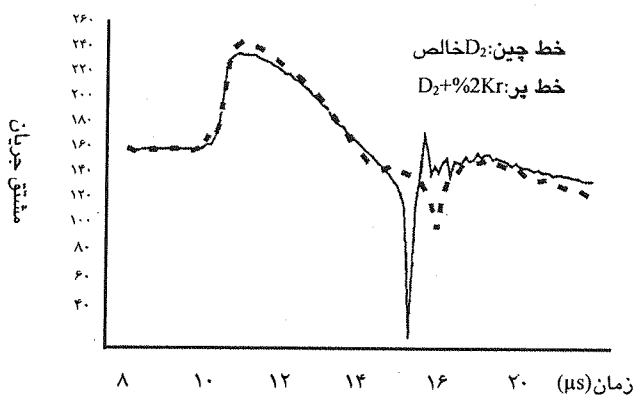
ناپایداری‌های مگنتوهیدرودینامیکی^۲ بر اساس عددمد قطبی شان ($e^{im\theta}$) تقسیم بندی می‌شوند. با تأثیر یک اغتشاش قطبی متقارن حول ستون پلاσμα در یک نقطه فشار وارد می‌شود و چگالی میدان طولی که در این نقطه از سطح مقطع کوچک تری می‌گذرد، میدان مغناطیسی قدرتمندتری ایجاد می‌کند. میدان مغناطیسی قوی‌تر موجب اعمال نیروی بزرگ تری به سمت درون در نقطه مورد نظر می‌گردد. پس ستون پلاσμα فشرده تر می‌شود که به ناپایداری مد $m=0$ (یا ناپایداری سوسیسی^۲) معروف است. در نتیجه پس از ایجاد پلاسمایی با چند میلی متر قطر و چند سانتی متر طول در نزدیکی آند و تخریب جریان پینچ در اثر ناپایداری مد $m=0$ ، پرتوهای یونی و الکترونی (T_{max} الکترون بین ۵keV-۱۰۰eV و T_{max} یون بین ۹keV-۳۰۰eV)، اشعه X نرم (چند صد eV تا ۱keV)، اشعه X سخت (~۱۰۰keV) و در صورت استفاده از دوتریم، نوترون (تا مرتبه حدود 10^{12} نوترون در هر تخلیه) تولید می‌شوند [۱]-[۳]. این دستگاه منبع ساده و مفیدی برای ایجاد تابش‌هایی از قبیل نوترون، اشعه X و پرتوهای یونی و همچنین برای مطالعه دینامیک پلاσμα بسیار مناسب است [۴]. دستگاه پلاسمای کانونی دنا از نوع فیلیپوف^۳ با بیشینه انرژی ذخیره شده ۹۰kJ و ولتاژ شارژ بیشینه ۲۵KV موجب عبور جریان حدود ۱MA از محفظه تخلیه می‌شود. آند دستگاه از جنس مس به قطر ۴۸۰mm است که در مرکز آن قطعه قابل تعویض^۵ از مواد با نقطه ذوب بالا (آلیاژ تنگستن) قرار دارد. محدودکننده این دستگاه؛ که در قسمت پوشش بالایی^۶ کاتد قرار دارد، از آلیاژ آلومینیم است که به صورت دایره‌ای به قطر ۱۶۰mm و به ضخامت ۳mm می‌باشد [۵].

نوترون با اختلاف زمانی حدود ۴۸۰ ns (برای گاز D_2+2Kr) به وسیله آشکارساز سوسوزن پلاستیکی^{۱۲} برای این دوگاز نشان داده شده است:

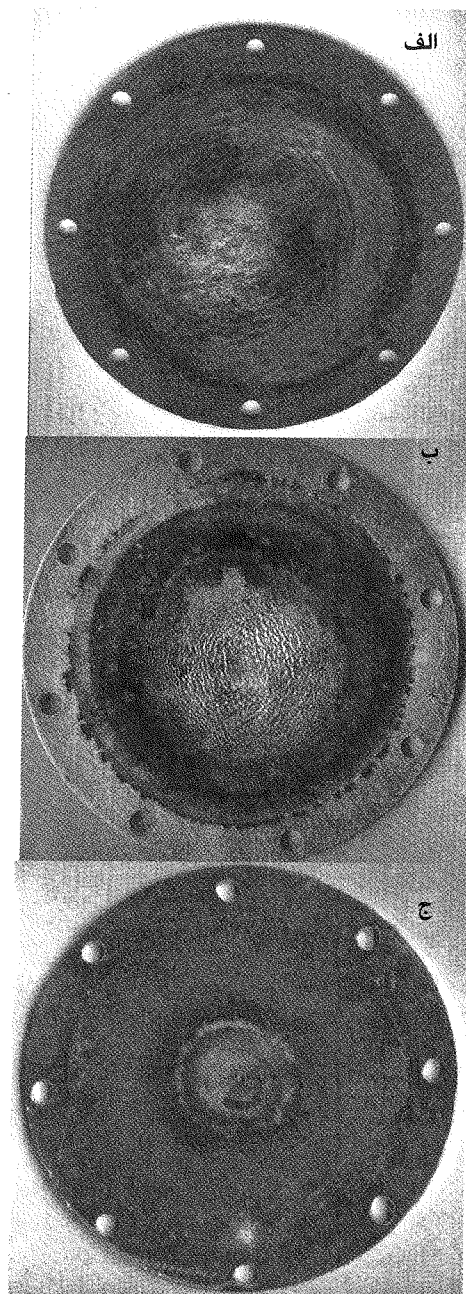
گسیل اشعه ایکس سخت، برخورد باریکه‌های غیرحرارتی و پرنرژی الکترونی با سطح الکترود آند است و طبق آزمایش‌های انجام شده، تولید نوترون با میزان گسیل اشعه X سخت ارتباط دارد (شکل (۵)) [۶].



شکل (۳): تصویر حاصل از دوربین روزنه سوزنی پس از تنش پلاسمایی با گازهای الف: Ar، ب: D_2+2Kr و ج: D_2



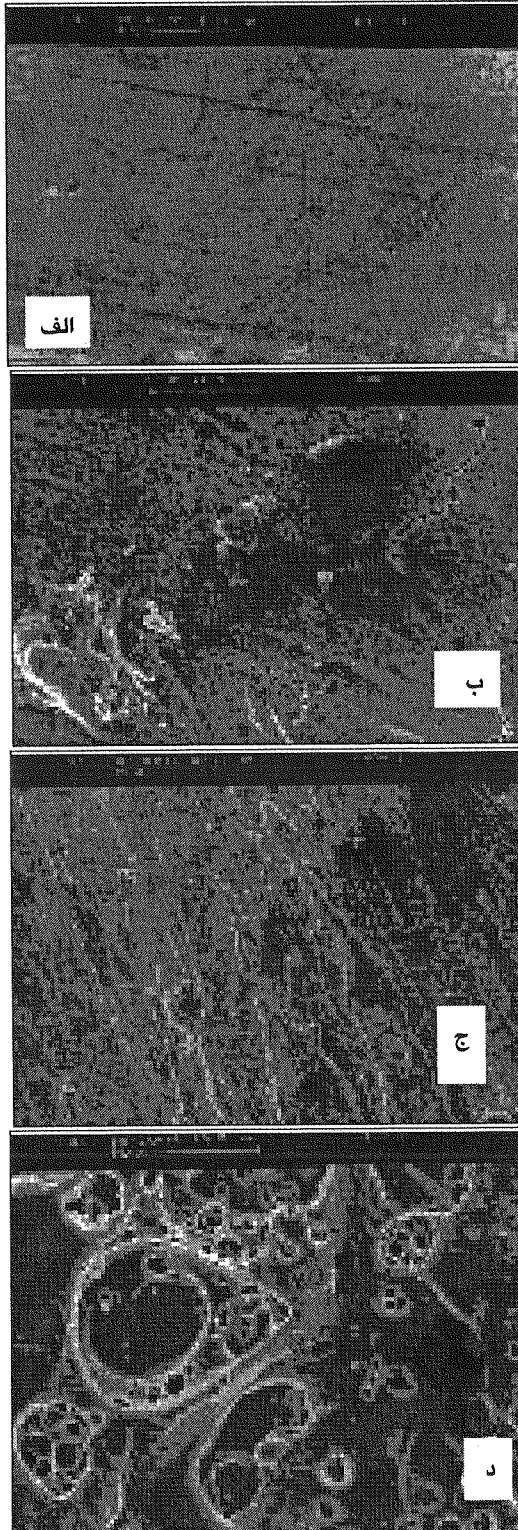
شکل (۴): منحنی مشتق جریان در ولتاژ تخلیه ۱۶kV برای دوگاز D_2+2Kr و D_2



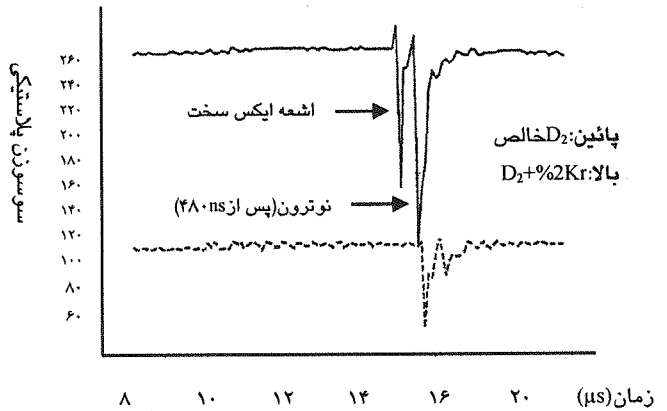
شکل (۲): تصویر محدود کننده پس از تنش پلاسمایی با گازهای الف: Ar، ب: D_2+2Kr و ج: D_2

کمینه سریع در منحنی مشتق جریان مربوط به یک پالس، کیفیت پینچ را مشخص می‌کند. در شکل (۴) نمونه‌ای از منحنی مشتق جریان پلاسمای برای گازهای D_2+2Kr و D_2 رسم شده است. در شکل (۵) نمونه‌ای از سیگنال خروجی اشعه X سخت و

ترکیب گاز Kr در D_2 و سنگین بودن آن نسبت به دوتریم انتظار داریم که Kr از حبابزایی مؤثر D_2 جلوگیری کرده و نحوه توزیع آن بر سطح لیمپتر همانند شکل (ج-۶) به جهت مندی و کشیدگی تنش ها منجر می‌گردد [۱۰].



شکل (۶): تصویرهای میکروسکوپ الکترونی نمونه ها به ترتیب (الف): قبل از تنش و پس از تنش پلاسمایی با گازهای (ب) Ar، (ج) $D_2+2\%Kr$ و (د) D_2



شکل (۵): سیگنال خروجی نوترون و اشعه ایکس سخت در ولتاژهای تخلیه شده شکل (۴)

بر اساس شبیه سازی‌های دینامیکی Z پنج ها در فاز فشرده سازی محوری، در اثر تابش، پارامتر لاسون^{۱۳} پلاسمای چگال (nT) افزایش یافته است که افزایش تعداد واکنش های گداخت و در نتیجه افزایش نوترون را در پی خواهد داشت؛ برای همین افزودن مقدار اندکی ناخالصی سنگین باعث افزایش تابش اشعه ایکس نرم از پلاسمای کانونی و در نتیجه افزایش نوترون می‌شود (شکل (۵)).

در شکل (۶) تصویرهای میکروسکوپ الکترونی^{۱۴} از نمونه اولیه قبل از تنش پلاسمایی و همچنین پس از تنش پلاسمایی مشاهده می‌شوند.

۳- تحلیل و نتیجه گیری

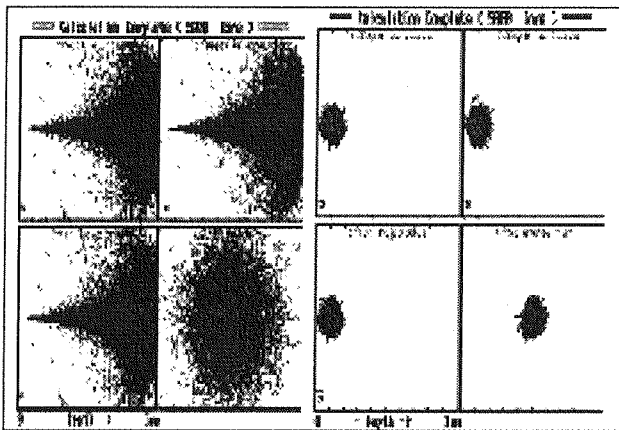
با توجه به تصویرهای به دست آمده از دوربین روزنه سوزنی؛ که نقاط تیره تر متناظر با حرارت بیشتر است، در نمونه‌ها انتظار تنشی بیشینه را در مرکز نمونه داریم. نقاط داغ^{۱۵}؛ که در شکل (ب-۳) مشاهده می‌شود، چشمه گسیل نوترون هاست [۷] و این تصویر با نتیجه حاصله در شکل (۵) که افزایش بهره نوترونی در اثر افزودن ۲٪ گاز کریپتون را به همراه داشته است، سازگار است.

وقتی اتم های گاز به سطح فلزی برخورد می‌کنند، به داخل فلز نفوذ کرده و پس از مدتی این اتم ها بهم می‌پیوندند و حباب‌هایی از گاز را داخل فلز پدید می‌آورند. این حباب ها رشد کرده و پس از مدتی می‌ترکند که موجب تخریب سطحی هدف می‌شوند [۸].

در اثر استفاده از گاز D_2 به دلیل خاصیت حبابزایی^{۱۱} آن بر روی سطح نمونه، تصویری مانند شکل (د-۶) را خواهیم داشت [۹]. همچنین گاز $D_2+2\%Kr$ نیز حبابزایی کرده و به دلیل

(شکل ب-۲).

همچنان که مشاهده شد، اثرات تشکیل لایه ذوب و حرکت این لایه در اثر گازهای سنگین Ar و Kr به علت گرادیان فشار پلاسما، نیروی لورنتس و تنش سطحی، حبابزایی در اثر استفاده از گاز D₂ و درخشندگی سطحی در دستگاه دنا مشاهده شده است و این سه عامل از عمده‌ترین مواردی هستند که به تخریب دیواره اولیه راکتور گداخت منجر می‌شوند.



شکل (۷): نمونه ای از پخش سطحی یون‌های آرگن (سمت راست) و دوتریم (سمت چپ) با انرژی ۱۰۰ KeV بر سطح آلومینیم با استفاده از نرم افزار TRIM

از شکل (الف-۲ و ب-۲) می‌توان اثرات ایجاد قوس‌های تک قطبی^{۱۸} را؛ که از عوامل اساسی تخریب سطوح در معرض تابش‌های شدید است، مشاهده کرد. با افزایش دمای دیواره در اثر برخورد یون‌های پلاسما، الکترون‌های گرمایونی و ثانویه گسیل می‌شوند. اکثر جریان با الکترون‌ها حمل شده است که به ذوب سطح نمونه منجر می‌شوند و با تبخیر یا پراکنش به بیرون پرتاب می‌شوند.

در اهداف آتی، تمرکز بر روی تحولات محدود کننده دستگاه در اثر نوترون‌های شدید، ثابت نگه داشتن گاز سوختی و تغییر جنس محدود کننده و نیتروژن دهی سطح محدود کننده قبل و پس از تنش پلاسمایی با گازهای مختلف و مطالعه سختی آنها را مد نظر قرار خواهیم داد. در همین راستا آزمایش‌هایی با پلاسمای He اجرا شده و همچنان که انتظار داشتیم اثرات حبابزایی در تصویرهای SEM مشاهده شده است و He به دلیل پخش سطحی کمتر و ایجاد فضای خالی بیشتر نسبت به D₂ حباب‌های بزرگ تری را بر سطح نمونه تشکیل داده است.

حبابزایی گاز D₂ از عوامل مهم تخریب سطحی است و با استفاده از شبیه سازی TRIM مشاهده می‌شود که یون‌های D₂ به دلیل سبکی از لابلای ساختار شبکه هدف گذشته و پس از طی مسیری پر پیچ و خم متوقف و در اثر پالس‌های متعدد حباب تشکیل می‌شود (شکل ۷)؛ اما Ar پس از برخورد با شبکه اتمی Al به سرعت متوقف شده و به تخریب شدید سطحی منجر می‌شود [۱۰]، [۱۱]. در پراکنش فیزیکی^{۱۷}؛ که ذره برخورد کننده یا اتم پس زده شده انرژی را به یک اتم در سطح (یا زیر لایه سطحی) انتقال داده، به طوری که این انرژی بر انرژی بستگی سطحی غلبه کند، از دلایل مهم رهاسازی ناخالصی‌ها در پلاسمای کانونی می‌باشد؛ زیرا این پدیده بدون توجه به ماهیت شیمیایی شرایط دیواره و دمای دیواره رخ می‌دهد [۱۲]؛ لذا در شکل‌های (الف-۲) و (ب-۲) که گاز سنگین Kr نیز به کار رفته است، همان طور که پیش بینی می‌کنیم، سطح نمونه کاملاً تخریب شده و در اثر حرکت لایه ذوب به علت گرادیان فشار پلاسما، نیروی لورنتس و تنش سطحی، از مرکز سطح محدود کننده به سمت محیط آن از مواد ذوب شده پوشیده شده است. تبخیر لایه نازکی از هدف ابری از بخار پلاسما ایجاد می‌کند که به عنوان حفاظ گرمایی سطح را از تبخیر بیشتر باز می‌دارد؛ ولی فلزات سبکی مانند آلومینیم در برابر اغتشاشات گرمایی نمی‌توانند مقاومت کنند. برهمکنش بخار پلاسمای داغ با فلز هدف به تخریب نمونه هدف منجر می‌شود و خوردگی هدف نتیجه‌ای از فرایند ترشح لایه ذوب است؛ از این رو لایه ذوب از دهانه آتشفشان مانند خوردگی حرکت و تپه‌هایی را در اطراف دهانه ایجاد می‌کنند [۱۲]، [۱۳]. همچنین سطح محدود کننده در شکل‌های (الف-۲) و (ب-۲) نسبت به سطح محدود کننده تحت تنش پلاسمای D₂ درخشش زیادی دارند. با توجه به اینکه یون‌های سنگین پر انرژی همچون Ar و Kr قادرند که از مرتبه نانومتر اتم‌هایی را که بستگی ضعیف‌تری با سطح دارند، جابجا کرده و نقاط مرتفع و گود سطح را هموار کنند و به سطحی درخشان تبدیل شوند [۱۵]، این اثر قابل پیش بینی بوده است. نوترون به دلیل بدون بار بودن، ضمن تخریب درونی، موجب شکست سطحی نیز می‌شود و این مسئله به صورت گسترده‌ای در توکامک‌ها؛ که نوترون زیادی بر سطح دیواره اولیه برخورد می‌کند، بررسی شده است. همچنان که در شکل (۵) نشان داده شده است، بهره نوترون پس از افزودن مقدار ۲٪ کریپتون به طور قابل توجهی افزایش یافته است و می‌توان آن را به عنوان یکی از علل تشدید کننده تخریب سطحی محدود کننده آلومینیمی در نظر گرفت

- | | | | |
|--|--|--|------|
| ۱- Dense Plasma Focus | ۲- MagnetoHydroDynamic (MHD) Instability | M. Zakauallah, Ijaz Akhtar, and G. Murtaza, physics of plasmas, August 1999, Volume 6, Issue 8, pp. 3188-3193. | [۱] |
| ۳- Sausage instability | ۴- Filippov type PF | H. Conrads; Dense plasma focus as a neutron source for fusion research , Nuclear science& Engineering, 106, pp 299-307(1999) | [۲] |
| ۵- Anode Insert | ۶- Upper flange | S. Lee, PH. Sakanaka; Technology of a small plasma focus incorporating some experience with the UNU/ICTP PFF in small plasma physics experiments, World Sci Pub Co(199۸) 113-169. | [۳] |
| ۷- International Experimental Fusion Reactor(ITER) | ۸- Pin hole Camera | N. V. Filippov, T. F. Filippova et al, Mega joule scale plasma focus as efficient X-ray source, Physics Letters, A211:168-171(199۹). | [۴] |
| ۹- Rogowski Coil | ۱۰- Matching Inductance | M. Tafreshi ;M. Farrahi et al; Dena, a new PF Device, NUKLEONICA, 2001;46 8S 87. | [۵] |
| ۱۱- Spark gap | ۱۲- Plastic Scintillation Detector | S. Hussain, and etc, Plasma Focus as a High Intensity Flash X-ray Source for Biological Radiography, Journal of Fusion Energy, Vol. 22 No. 3, September 2000 | [۶] |
| ۱۳- Lawson creation | ۱۴- Scanning Electron Microscopy(SEM) | M. G. Haines, Dense Plasma in Z-pinches and the Plasma Focus, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 300, No. 1456(Apr. 23, 198), pp 649-663. | [۷] |
| ۱۵- Hot Spot | ۱۶- Bubbling effect | A N Bandura; N Byrka et al; Melt Layer Behavior of Metal Targets Irradiated by Powerful Plasma Streams , Journal of Nuclear Materials , 307-311(200۲) | [۸] |
| ۱۷- Physical Spattering | ۱۸- Unipolar Arc | Gribkov, On Possible Formation of Problems Of a Dense Plasma Focus Used in Material Sciences, 2000; 45(3) : 149453 Nukleona, | [۹] |
| | | T. Dolan, Fusion Research, Pergamon Press, reprint 2002. | [۱۰] |
| | | A.N.Bandura, et all, Melt layer behaviour of metal targets irradiated by powerful plasma streams, Journal of Nuclear materials, 307-311(200۲) | [۱۱] |
| | | N. I. Arkhipov et al; Material erosion and erosion products in disruption simulation experiments at the MK-200UG facility , Fusion Engineering and Design, 49-5(2000) 151 -156. | [۱۲] |
| | | R. J. LeClaire The impact of thermal fatigue of thermal fatigue and other design limits on , pulsed commercial tokamak reactor design Volume 4, Number 5 / October, 1985, Journal of Fusion Energy | [۱۳] |
| | | V Safronov, N Arkhinpov et al, Material Erosion and Erosion products under plasma heat loads typical for ITER hard disruption, Journal of Nuclear Materials, 2001, 290-29. | [۱۴] |
| | | V.I.Tereshin et al; Influence of a pressure gradient on melt layer macroscopic erosion of metal targets in disruption simulation experiments, journal of nuclear materials, Volumes 313-316, March 2003, Pages 685-689 | [۱۵] |
| | | I. Yamada, A short review of ionized cluster beam technology, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B99(199۸) 240-243. | [۱۶] |