



طراحی و ساخت کاتد با قابلیت خنک شونده برای روش محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی به منظور افزایش زمان کارکرد دستگاه

علیرضا اصل زعیم[✉]، مرتضی صداقت موحد^{ID}، علی باقری^{ID}، مجتبی کبیر^{ID}، مریم قپانوری^{ID}، آمنه کارگریان^{ID}
پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

*Email: aaslezaeem@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۱۸ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۹/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۹/۲۷

چکیده

یکی از دستگاه‌هایی که به منظور محصورسازی پلاسما و انجام اندرکنش‌های گداخت هسته‌ای خصوصاً برای تولید نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرد دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی است. اعمال میدان الکتریکی قوی بین دو الکترود مشبک در این دستگاه، موجب یونیزاسیون و شتاب‌گیری یون‌ها به سمت ناحیه مرکزی آن می‌شود. انرژی یون‌ها در این ناحیه بسته به اختلاف ولتاژ اعمالی بین دو الکترود چند ده کیلو الکترون‌ولت است. لذا در صورت استفاده از گاز دوتریم موجب انجام واکنش‌های گداخت هسته‌ای و تولید نوترون‌های سریع می‌گردد. داغ شدن بیش از اندازه الکترود مرکزی (کاتد) به علت برخورد یون‌های پرانرژی یکی از معضلات عمده در این نوع دستگاه‌ها است. این موضوع علاوه بر این که باعث عدم امکان کارکرد دستگاه در شرایط پایدار و در زمان طولانی می‌شود، توان اعمالی به دستگاه را محدود کرده است. در این کار پژوهشی، برای رفع این مشکل یک کاتد همراه با ورودی ولتاژ بالا با قابلیت خنک شونده در دستگاه IR-IECF ساخته و استفاده گردید. از آب دوبار-یونیزه به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شد تا کاتد جدید با قابلیت آبگرد که متصل به منبع تغذیه ولتاژ بالا است بدون انتقال این ولتاژ به پمپ آب/ قادر باشد در توان‌های بالاتر از ۳ کیلو وات و بدون ذوب شدن به کارکرد خود ادامه دهد و در ضمن سیال خنک‌کننده به دمای جوش نرسد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در این مورد توافق خوبی دارند.

کلیدواژه‌ها: محصورسازی الکترواستاتیکی، گداخت دوتریم، خنک کاری کاتد

Design and construction of actively cooled cathode for inertial electrostatic confinement approach to extend the operational time

A.R. Asle Zaeem*, M. Sedaghat Movahhed, A. Bagheri, M. Kabir, M. Ghapanvary, A. Kargarian

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran – Iran

Research Article

Received: 9.7.2023, Revised: 4.12.2023, Accepted: 18.12.2023

Abstract

Inertial electrostatic confinement fusion (IECF) devices are utilized for studying nuclear fusion reactions, particularly for fusion neutron production. A strong electric field between two transparent electrodes results in the formation and acceleration of ions toward the device's center. The energy level of these accelerated ions reaches tens of kilo-electron volts, sufficient to produce fast neutrons through nuclear fusion reactions when deuterium gas is used. Overheating due to collisions of high-energy ions with the cathode surface is a primary issue that limits the applied power and long-term stable operation of these devices. In this research, an actively cooled cathode was designed and constructed for the IR-IECF device. Deionized recirculating water was used as the coolant to reduce the cathode temperature. The cathode, connected to a high voltage power supply via a feedthrough, can prevent high voltage breakdown and melting at input powers exceeding three kilowatts. Both theoretical and experimental results show excellent agreement in heat removal during continuous operation.

Keywords: Inertial electrostatic confinement, Deuterium fusion, Cathode cooling



۱. مقدمه

از دستگاه‌های متداول در زمینه محصورسازی پلاسما در گداخت هسته‌ای، دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی-اینرسی است. این دستگاه متشکل از دو کره فلزی مشبک و هم‌مرکز (و یا دو استوانه هم‌محور) به عنوان آند و کاتد است. این الکترودها توسط یک منبع تغذیه الکتریکی به اختلاف پتانسیل بسیار بالا (معمولاً حدود بیست تا صدوپنجاه کیلو ولت) متصل می‌گردند. هم‌زمان با تخلیه الکتریکی گاز در محفظه دستگاه، الکترون‌ها شروع به حرکت و شتاب‌گیری نموده ضمن یونیزاسیون گاز کاری به سمت آند حرکت می‌کنند. یون‌ها تولید شده، در میدان الکتریکی به سمت مرکز و الکترون‌ها (و یون‌های منفی تولید شده بر اثر پتانسیل منفی الکتروود کاتد [۱]) در جهت عکس، شتاب گرفته موجب ایجاد یک ناحیه پلاسمای نسبتاً داغ و چگال در مرکز سیستم می‌گردد. پلاسمای ناحیه مرکزی در محدوده فشاری چند میلی تور تا چند پاسکال از نوع تخلیه تابان^۱ بوده که محل انجام واکنش‌های هسته‌ای است و در صورت استفاده از گاز دوتریم، نوترون‌های گداخت هسته‌ای با انرژی ۲/۴ مگا الکترون‌ولت تولید می‌نماید [۲]. با توجه به شتاب‌گیری و برخورد الکترون‌ها به سمت محفظه خارجی دستگاه، علاوه بر نوترون، اشعه ایکس نرم و سخت در این دستگاه تولید می‌گردد. ایده انجام گداخت به روش الکترواستاتیکی از اوایل سال ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ توسط فرانس-ورث^۲ و هرش^۳ مطرح شد، که در آن شبکه کروی توری‌شکل در داخل محفظه خلأ به ولتاژ بالا وصل می‌شد تا یون‌ها به سمت مرکز دستگاه شتاب گیرند و گداخت هسته‌ای در ناحیه مرکزی انجام شود. با استفاده از همین روش "هرش" با به‌کارگیری سوخت دوتریم-تریتیم، توانست تا 2×10^{10} نوترون بر ثانیه را در حالت پایا و پیوسته با استفاده از اضافه کردن شش چشمه یونی، به‌دست آورد. نظر به محدوده نرخ تولید نوترون، این نوع دستگاه‌ها می‌تواند جهت مقاصد تشخیصی مانند تصویربرداری با نوترون‌های سریع^۴، رادیوگرافی با نوترون و یا روش تشخیصی به وسیله آنالیز گامای آبی ناشی از فعال‌سازی نوترونی^۵ مورد استفاده قرار گیرد [۳-۷]. در یک دستگاه الکترواستاتیک اینرسی فرایندهای مختلفی در تولید نوترون مؤثر هستند. آزمایش‌های مختلف نشان داده‌اند که به طور عمده چهار فرایند اصلی منجر به واکنش‌های هسته‌ای و تولید نوترون در این نوع

دستگاه‌ها می‌شود. به واسطه این فرایندها، رژیم‌های مختلف کاری برای تولید نوترون در این نوع دستگاه متصور است: گروه (۱) واکنش‌های باریکه یون با گاز زمینه گروه (۲) واکنش‌های باریکه یون با باریکه یون گروه (۳) واکنش خنثی‌های پرانرژی با گاز زمینه گروه (۴) واکنش یون‌های پرانرژی با یون‌های نشسته و یا لایه‌نشانی شده بر روی سطح کاتد.

فرایندهای گروه اول و دوم با توجه به افزایش سطح مقطع واکنش هسته‌ای دوتریم-دوتریم با افزایش انرژی ذرات برخوردکننده که در محدوده انرژی صفر تا صدوپنجاه کیلو الکترون ولت برای دستگاه‌های الکترواستاتیکی اینرسی است؛ واکنشی مطلوب جهت تولید نوترون به شمار می‌روند. واکنش‌های دسته سوم نیز ناشی از برخورد ذرات خنثی پرانرژی هستند که خود در مسیر حرکت یون‌های شتاب‌دار ایجاد می‌شوند (طی واکنش تبادل بار^۶) و این ذرات خنثی می‌توانند حداکثر به اندازه یون‌های پرانرژی دستگاه انرژی داشته باشند از طرفی از آنجایی که واکنش‌های ثانویه پس از تبادل بار باعث این فرایند می‌شود نرخ این واکنش‌ها در مقایسه با واکنش‌های دسته اول و دوم کمتر است. واکنش‌های گروه چهارم که تحت عنوان گداخت سطحی^۷ نیز شناخته می‌شوند اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند و نتایج تجربی نشان داده است بیش از هشتاد درصد از سهم کل واکنش‌های گداخت در محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی خصوصاً در انرژی‌های زیر چهل کیلو الکترون ولت مربوط به این دسته از واکنش‌ها هستند [۸]. تولید نوترون در این دستگاه‌ها و در محدوده ولتاژ کاری زیر دویست کیلو ولت برای سوخت دوتریم به طور نمایی به اعمال ولتاژ الکتریکی کاتد بستگی دارد. همچنین بستگی خطی تولید نوترون به جریان کاتد در گزارشات تجربی به اثبات رسیده است [۹-۱۲]. از طرفی، افزایش ولتاژ و جریان کاتد موجب افزایش تعداد و انرژی یون‌های برخوردی به این الکتروود می‌شود و آن را تا دمای ذوب داغ می‌کند. لذا برای رفع این مشکل در این مقاله نتایج حاصل از طراحی و ساخت الکتروود کاتد جدید با قابلیت خنک‌شوندگی پرداخته شده است. در شکل ۱ دستگاه IR-IECF در پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای همچنین کاتد از جنس استیل این دستگاه که در حین کارکرد و برخورد یون‌های پرانرژی به آن داغ شده است قابل ملاحظه است.

1. Glow Discharge

2. Farnsworth

3. Hirsch

4. Fast Neutron Imaging

5. Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA)

6. Charge Exchange

7. Surface Fusion

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 45 (4), Serial Number 110, 2025, P 58-66



شده در مجموع برابر با ۹۰۰ mm می باشد که در شبیه سازی وارد شده است. با توجه به این که آب در دمای 100°C از فاز مایع خارج شده و به بخار تبدیل می شود، شبیه سازی انجام شده برای دمای پایین تر از آن معتبر خواهد بود. لذا نمودارهای حاصل از فرایند شبیه سازی برای اعداد بالاتر از دمای جوش آب در نظر گرفته نشده است. برای شبیه سازی فرایند خنک کاری الکتروود مرکزی از ماژول های انتقال حرارت^۱ و جریان آرام^۲ و در نرم افزار کامسول^۳ که به صورت کوپل شده قرار داده شدند، استفاده شده است. تمام معادلات سیالی و انتقال حرارت به صورت کلی و با جزئیات در نرم افزار به صورت کوپل شده به صورت ماتریس جداسازی شده و حل می شوند.

با توجه به تجهیزات موجود برای خنک کاری الکتروود مرکزی، نرخ جریان های 0.5 L/min ، 0.6 L/min ، 0.7 L/min و 0.8 L/min برای آب ورودی به لوله در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به منبع تغذیه موجود و تجهیزات آن، نرخ شار گرمایی جذب شده بر سطح لوله استیل برابر با اعداد 200 W ، 500 W ، 1000 W قرار داده شده است. در ابتدا دمای ماکزیمم سطح استیل با توجه به توان ورودی یا شار گرمایی ورودی بر سطح استیل اندازه گیری شده است. با توجه به اعداد به دست آمده مطابق با نمودار شکل ۳ می توان نتیجه گیری کرد که حتی با وجود توان جذب شده حرارتی 1000 W نیز سطح لوله استیل به دمای ذوب نخواهد رسید. دمای ذوب استیل در حدود 1370°C می باشد. البته با توجه به وجود آلیاژهای مختلف این عدد تقریبی است و مقداری متفاوت خواهد بود.

تغییراتی که بسیار حایز اهمیت شناخته شده است در واقع دمای آب خروجی از لوله برحسب تغییرات نرخ جریان آب ورودی است. نمودار شکل ۴ این تغییرات را نشان می دهد. در واقع با توجه به این که دمای تغییر فاز آب به بخار برابر با 100°C است، می توان دریافت که برای نرخ جریان های مختلف ورودی آب، تا حداکثر چه توان یا شار گرمایی می توان به سطح لوله وارد کرد که آب دچار تغییر فاز نشود. با توجه به نمودار و اعداد به دست آمده از شبیه سازی برای نرخ جریان 0.5 L/min حداکثر توان قابل تحمل برابر 700 W وات خواهد بود. همچنین برای نرخ جریان 0.6 L/min این مقدار برابر 750 W و برای نرخ جریان 0.7 L/min برابر 800 W خواهد بود. علاوه بر این، برای نرخ جریان 0.8 L/min حداکثر توان قابل تحمل برابر 870 W است.



شکل ۱. نمایی از الکتروود کاند در حین کارکرد دستگاه.

۲. شبیه سازی خنک کننده

برای رفع مشکل گرم شدن بیش از اندازه کاند در این دستگاه، بهترین راه حل استفاده از یک کاند با قابلیت آبگرد است که ملاحظات ولتاژ بالا و خلأ در آن رعایت شده باشد. در مرحله اول برای اثبات امکان پذیر بودن خنک کاری کاند با در نظر گرفتن میزان توان اعمال شده بر آن ناشی از برخورد شار یون های پراورژی شبیه سازی فرایند خنک کاری دستگاه IECF با استفاده از نرم افزار کامسول انجام شده است. با توجه به این که ظرفیت گرمایی آب بالا و در حدود 4187 J/Kg.K است، جهت خنک کاری الکتروود مرکزی از آب دوباریونیزه به عنوان سیال خنک کننده استفاده شده است، تا سیال خنک کننده با حداقل رسانندگی الکتریکی به کار گرفته شود.

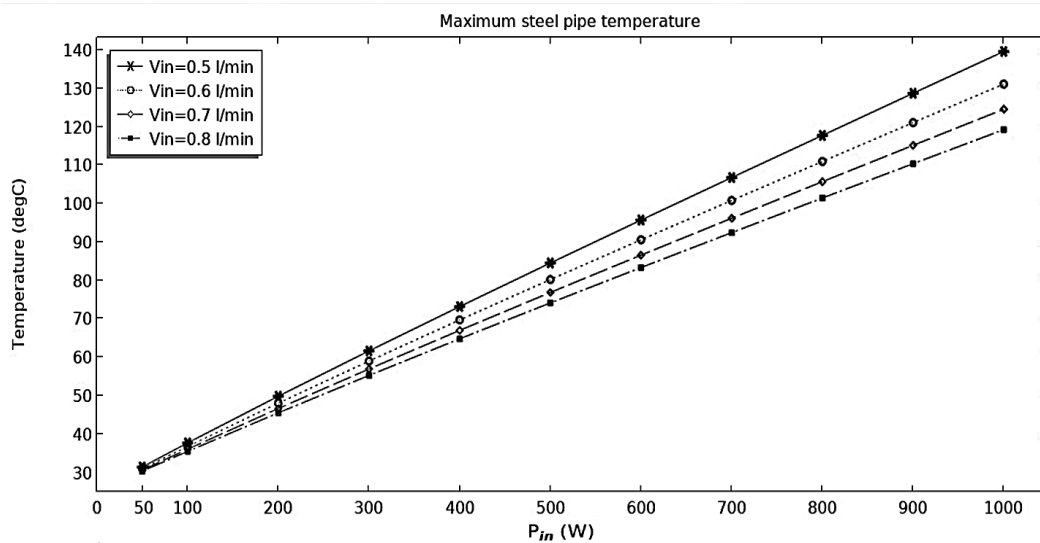
در واقعیت گرم شدن لوله به علت برخورد یون ها به سطح آن است. به علت تک انرژی بودن یون های برخوردی به سطح لوله و وابستگی آن به ولتاژ کاند (میدان الکتریکی بین دو الکتروود کاند و آند، یون ها را به اندازه حاصل ضرب اختلاف ولتاژ در بار الکتریکی یون انرژی می دهد) فلاکس انرژی یا همان توانی که به واسطه برخورد یون ها به سطح لوله منتقل می شود در شبیه سازی به عنوان یک منبع توان سطحی در نظر گرفته شده است. به عبارتی دیگر، توان اعمالی به سطح لوله در شبیه سازی به صورت یک منبع سطحی در سرتاسر لوله در نظر گرفته شده است. اندازه گیری تجربی دمای سطح لوله ممکن نبود زیرا لوله در داخل محفظه خلأ و متصل به ولتاژ بالا است. لذا برای تخمین دمای سطح لوله از شبیه سازی استفاده گردید. ولی اندازه گیری تجربی دمای آب خروجی امکان پذیر بود که در بخش های بعد به آن پرداخته شده است.

شکل ۲ نمایی از لوله استیل طراحی شده نشان می دهد. قطر داخلی لوله استیل 2 mm در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره لوله برابر با 1 mm می باشد. دمای آب ورودی 25°C در نظر گرفته شده است. طول الکتروود مرکزی ساخته

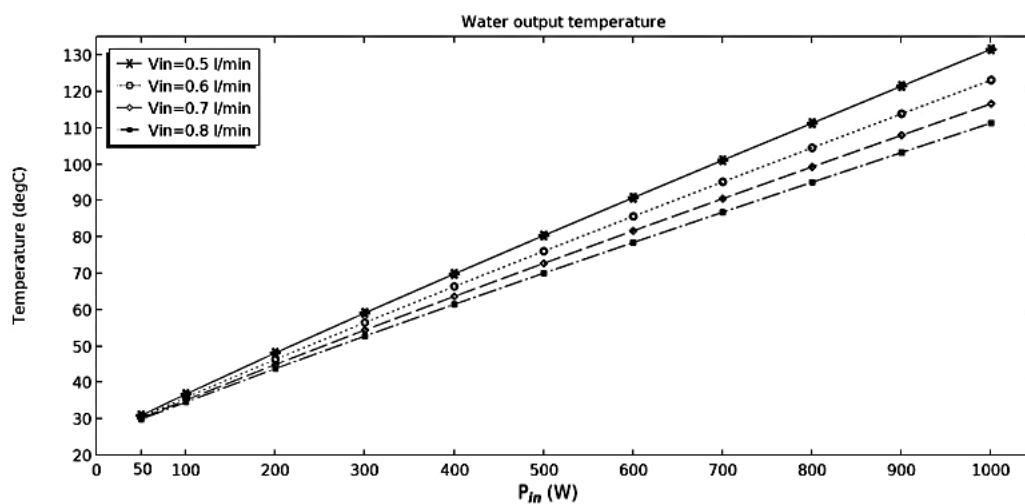




شکل ۲. نمایی از لوله طراحی شده در نرم افزار که مرکز آن آب و پوسته آن از جنس استیل در نظر گرفته شده است.



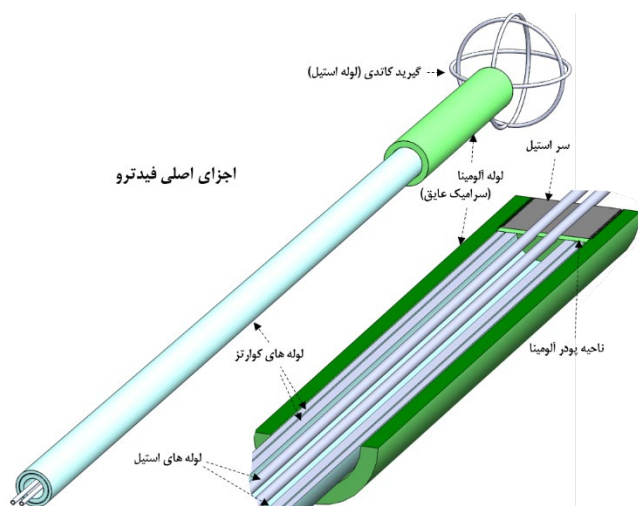
شکل ۳. دمای سطح لوله استیل در توان های حرارتی مختلف و نرخ جریان های ورودی آب متفاوت.



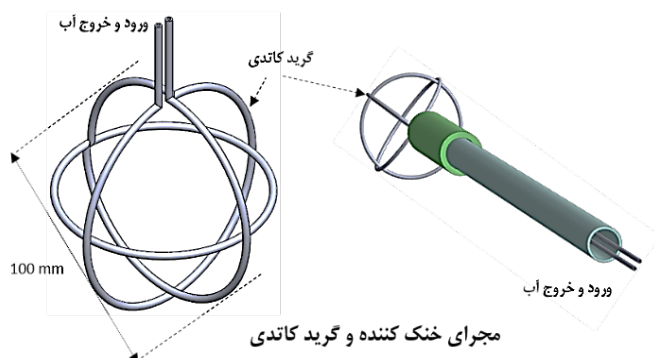
شکل ۴. دمای آب خروجی در نرخ جریان های آب ورودی برحسب توان اعمالی بر سطح لوله.



لوله استیل ۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، الکتروود کاند به صورت کره‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده است. این کره از پیچاندن لوله استیل مذکور به صورت سه دایره به قطر خارجی ۱۰ سانتی‌متر مطابق با شکل‌های ۶ و ۷ طراحی و ساخته شده است. شکل‌های ۶ و ۷ مشخصات الکتروود کاند و مسیر ورود و خروج آب خنک‌کننده را نشان می‌دهند.



شکل ۵. اجزای اصلی ورودی و ولتاژ بالا.



شکل ۶. الکتروود کاند و مسیر ورود و خروج آب.



شکل ۷. الکتروود کاند و محل اتصال با ورودی و ولتاژ بالا.

۳. طراحی و ساخت ورودی ولتاژ بالا و الکتروود کاند

یکی از اهداف این کار پژوهشی ساخت فیدترویی برای دستگاه IR-IECF بود که بتواند تا ولتاژ ۴۰ کیلو ولت را تحمل کرده و در اثر تخلیه الکتریکی دچار شکست الکتریکی نشود. همچنین بتواند جلوی خزش‌های جریان بین کاند و بدنه را در ولتاژهای بالا بگیرد. به علاوه، به کمک این فیدترو، الکتروود کاندی مرکزی در دستگاه IR-IECF خنک شده تا از ذوب شدن آن در توان‌های بالا پیشگیری گردد. برای این منظور علاوه بر ساخت فیدترو از جنس کوارتز، الکتروود کاند مرکزی دستگاه را نیز تغییر داده و از جنس لوله‌های استیل توخالی ساخته شده تا بتوانیم برای خنک‌سازی، آب را از درون کاند عبور دهیم. دو لوله کوارتز هم محور یک متری به همراه یک قطعه از جنس آلومینا و یک قطعه فلزی استیل در انتهای لوله‌های کوارتز قرار گرفته است. بعد از عبور لوله خنک‌کننده از مرکز لوله کوارتز، فضای خالی داخل و بین لوله‌های کوارتز توسط رزین اپوکسی پر شده تا خلأ دستگاه حفظ گردد. مقاومت حرارتی بالا و انتقال حرارت ضعیف، علت استفاده از لوله آلومینا در انتهای فیدترو بود، این کار باعث پیشگیری از گرم شدن بیش از اندازه لوله‌های کوارتز بوده که انتهای آن‌ها در معرض برخورد یون‌های پراثری قرار دارند. به عبارتی وظیفه اصلی لوله آلومینا، پیشگیری از تبخیر و ورود رزین اپوکسی داخل آن به محفظه خلأ است. از آنجایی که انتهای دیگر لوله‌های کوارتز از فیدتروی درب بالایی دستگاه عبور می‌کنند بنابراین اختلاف پتانسیل الکتریکی زیاد بین الکتروود کاند و درب بالایی محفظه دستگاه باعث خزش سطحی جریان بین این دو ناحیه می‌شود لذا وظیفه مهم دیگر لوله آلومینا و کوارتز پیشگیری از این خزش سطحی است. شکل ۵ اجزای اصلی ورودی ولتاژ بالا به همراه الکتروود مرکزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، ورودی ولتاژ بالا از چند قسمت اصلی (سر استیل، لوله آلومینا، ناحیه پودر آلومینا، لوله‌های کوارتز، لوله‌های استیل) تشکیل شده است.

مجرای خنک‌کننده شامل دو لوله استیل و الکتروود کروی بوده که به صورت یک تکه ساخته شده است. قبل از طراحی و ساخت این فیدترو، الکتروود مرکزی دستگاه در اثر بمباران دائمی یون‌ها به شدت داغ می‌شدند و امکان کارکرد پایدار با افزایش توان دستگاه به بیشتر از ۳۰۰ وات وجود نداشت (حداکثر ۲۰ کیلو ولت با ۱۵ میلی آمپر). اما با این طراحی جدید، آب از یکی از لوله‌های استیل به الکتروود کاندی وارد شده و با جذب حرارت الکتروود، از لوله استیل دیگر خارج می‌شود. این کار به‌طور پیوسته کاند را خنک می‌کند. در تمام طول مجرا، قطر

1. Outgas





شکل ۸. کارکرد الکتروود جدید در دستگاه IR-IECF و تشکیل پلاسمای دوتریم در ولتاژ ۲۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی آمپر.

۵. روش اندازه‌گیری توان گرمایی سطح کاتد

جریان الکتریکی کلی که در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی توسط منبع تغذیه خوانده می‌شود دارای دو سهم اصلی است. الف) جریان یونی رو به الکتروود مرکزی و ب) جریان الکترونی به سمت الکتروود کاتد و محفظه خلأ. لذا با فرض ثابت بودن بار الکتریکی پلاسمای و برقراری شرایط بقای بار می‌توان گفت که حدود نیمی از جریان کل، جریان یونی بوده و نیمی جریان الکترونی. بنابراین عملاً نیمی از توان الکتریکی دستگاه از طریق الکترون‌هایی که به جداره اصلی دستگاه برخورد می‌کنند تلف شده و موجب گرم شدن بدنه استیل دستگاه می‌شود. لذا با تقریب خوبی می‌توان جریان یونی دستگاه را نیمی از جریان واقعی دستگاه در نظر گرفت. از طرفی از بین یون‌هایی که به سمت الکتروود کاتد در حرکت هستند فقط کسری از آن‌ها با کاتد برخورد داشته موجب گرم شدن آن می‌گردند. زیرا الکتروود کاتد مشبک است و معمولاً نسبت سطح واقعی کاتد که در معرض برخورد یون است به سطح کروی کل آن را به عنوان شفافیت^۱ کاتد معرفی می‌کنند. قطر الکتروود کاتد جدید که در این طرح در نظر گرفته شده است ۱۰ سانتی‌متر است که به صورت سه دایره عمود بر هم از یک لوله استیل به قطر خارجی ۳ میلی‌متر ساخته شده است [۱۳]. شفافیت چنین الکتروودی را می‌توان به صورت رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$T\% = \left(1 - \frac{S'}{S}\right) \times 100 = \left[1 - \left(\frac{3 \times 2\pi r \times 0.5 \times 2\pi r'}{4\pi r^2}\right)\right] \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه S سطح خارجی کاتد و S' سطح در معرض برخورد یون r شعاع کاتد و r' شعاع لوله استیل به کار رفته برای ساخت کاتد است. برای کاتد مذکور شفافیت حدود ۸۶٪ محاسبه گردید. به عبارتی دیگر، حدود ۱۴٪ از یون‌ها به طور مستقیم با کاتد برخورد دارند و ۸۶٪ از آن‌ها بدون برخورد از

۴. نحوه خنک‌کاری

برای خنک‌کاری این الکتروود از آب دوبار یونیزه استفاده می‌شود چون این الکتروود از طریق فیدترو مربوطه به منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل بوده لذا رسانایی مایع خنک‌کننده در خنک‌کاری ایمن و اطمینان از عدم انتقال ولتاژ بالا به پمپ خنک‌کننده و کاربر امری حیاتی است. خروجی و ورودی این الکتروود که در قسمت بیرون محفظه خلأ قرار می‌گیرد توسط لوله پلاستیکی به یک پمپ آب متصل گردید. در این نوع پمپ‌های باید سیال ورودی با سرعت و فشار اولیه مناسبی وارد شود لذا از یک پمپ به همراه یک سیکل آب-گرد مجزا استفاده گردید. پمپ پشتیبان به ورودی پمپ اصلی متصل است و خود در داخل یک مخزن پلاستیکی پر از آب دی یونیزه قرار می‌گیرد. به عبارتی دیگر، آب دی یونیزه ابتدا از مخزن به پمپ اصلی پمپاژ می‌شود و پمپ اصلی فشار بالای لازم را جهت گردش آب در داخل لوله استیل فراهم می‌کند. این آب دوبار یونیزه، از داخل مجرای کاتد عبور کرده و مجدد از طریق مسیر برگشت که به لوله پلاستیکی متصل است، به داخل مخزن پلاستیکی باز می‌گردد. برای اندازه‌گیری دمای آب خروجی، حسگر دماسنج دیجیتال در قسمت ابتدایی بازگشت آب گرم به مخزن قرار داده شد. برای رعایت ملاحظات ایمنی از لوله‌های پلاستیکی بلند استفاده گردید که به دور استوانه پلاستیکی پیچیده شده است تا در صورت افزایش احتمالی رسانایی آب در حال چرخش، ولتاژ بالا در این مسیر طولانی افت پیدا کند و صدمه‌ای به کاربر و پمپ‌ها وارد نگردد. از یک دماسنج دارای نمایشگر دیجیتال برای اندازه‌گیری تغییرات دمای آب در حال چرخش در کاتد استفاده گردید. حسگر این دماسنج در محل خروجی آب برگشتی از کاتد و در ابتدای ورود به مخزن آب قرار داده شد. در واقع عددی که این دماسنج نشان می‌دهد دمای آب گرم شده و برگشتی از کاتد است. شکل ۷ الکتروود ساخته شده و مونتاژ آن را نشان می‌دهد که بر روی لوله ورودی ولتاژ بالا که از جنس آلومینا است قرار گرفته است. پس از نصب الکتروود در محفظه خلأ دستگاه IR-IECF و ایجاد شرایط فشاری مناسب در محفظه خلأ، گاز دوتریم در محفظه تزریق گردید که نمونه‌ای از کارکرد این الکتروود با گاز دوتریم در ولتاژ ۲۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی آمپر در شکل ۸ نمایان است.



آشکارساز و N تعداد نوترون‌های پخش شده در کل فضا در واحد زمان و n تعداد کل نوترون‌های رسیده به آشکارساز در واحد زمان است. جدول ۱ بیانگر اندازه‌گیری‌های نوترون در زمان استفاده از گاز دوتریم بوده که توسط آشکارساز LB۶۴۱۱ انجام گرفته است. این آشکارساز که از نوع شمارنده تناسبی هلیوم-۳ بوده قابلیت شمارش نوترون و دز معادل آن را دارد. این آشکارساز در فاصله ۶۰ سانتی‌متری از دستگاه IR-IECF قرار گرفته و خلاصه‌ای از نتایج اندازه‌گیری در جدول ۱ بیانگر شار و نرخ تولید نوترون‌های سریع در این دستگاه و با الکتروود جدید است. قابل ذکر است این کار پژوهشی به منظور افزایش زمان کارکرد کاند انجام گرفته و خنک‌کاری کاند نقشی در افزایش یا کاهش نرخ تولید نوترون نداشت.

قابل ذکر است که افزایش ولتاژ یا افزایش جریان در این دستگاه موجب افزایش توان اعمالی به کاند به صورت خطی می‌شود از طرفی افزایش ولتاژ به تنهایی، کارکرد پایدار دستگاه را به علت مشکلاتی مانند آرک زدن‌های ناگهانی در محفظه افزایش می‌دهد. دستگاه‌های الکترواستاتیکی در رژیم پلاسمای تابان محدوده فشاری نسبتاً بالایی دارد (10^{-3} تا 10^{-2} میلی بار) و این محدوده فشاری باعث آرک زدن‌های ناگهانی در این نوع سیستم‌ها است. در واقع آرک زدن ناگهانی خصوصاً در ولتاژهای بالا از مشکلات مشترک دستگاه‌های الکترواستاتیکی است که علاوه بر کارکرد ناپایدار به منبع تغذیه لطمه می‌زد. لذا امروزه مولدهای نوترونی از نوع باریکه یون-تارگت به علت نداشتن این مشکلات بیشتر مورد توجه هستند. در پروژه "طراحی و ساخت مولد نوترون با توان 10^7 نوترون بر ثانیه" یک نمونه از این نوع مولدها ساخته شده است. لذا در آزمایشات برای کارکرد پایدار دستگاه بیشتر سعی گردید تا افزایش توان از طریق افزایش جریان (تا محدوده صد میلی آمپر) انجام گیرد. همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد ملاحظات طول‌عمر منبع تغذیه و محدودیت جریان و ولتاژ منبع تغذیه نیز عوامل مهمی برای کارکرد در محدوده ولتاژ و جریان مذکور بوده است.

داخل کاند مشبک عبور می‌کنند. با در نظر گرفتن موارد فوق می‌توان توان حرارتی اعمال شده واقعی به کاند را طبق رابطه (۲) نوشت. در این رابطه I جریان خوانده شده توسط منبع تغذیه و V ولتاژ اعمال شده به کاند است.

$$P_{real} = \frac{1}{\gamma} I \times V \times (1 - T) \quad (2)$$

جریانی که توسط نمایشگر منبع تغذیه قرائت می‌شود در واقع حاصل جمع جریان یونی و الکترونی در داخل محفظه پلاسما است. به عبارتی دیگر سهمی از جریان کل در مدار را یون‌هایی که به سمت کاند حرکت می‌کنند تشکیل می‌دهد و سهم دیگر آن‌را الکترون‌هایی که به سمت آند حرکت می‌کنند. تقریب عدم تغییر چگالی پلاسما در حین کار از نظر برقراری قانون بقای بار موجب می‌شود که در حین کارکرد دستگاه نیمی از جریان الکترونی و نیمی از آن ناشی از حرکت یون‌ها باشد. لذا ضریب $\frac{1}{\gamma}$ در رابطه (۲) به این علت قرار داده شده است.

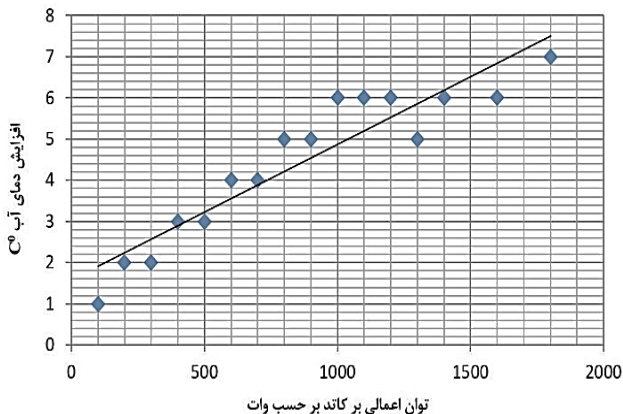
برای اندازه‌گیری نوترون ابتدا گاز دوتریم به محفظه تزریق می‌شود. سپس آشکارساز LB۶۴۱۱ که یک پروب شمارش نوترون است در فاصله ۶۰ سانتی‌متری کاند قرار داده شد. با اعمال ولتاژ و ایجاد جریان در محدوده‌ای که در جدول ۱ ذکر شده است عددی که توسط آشکارساز خوانده می‌شود ثبت گردید. این عدد در واقع بیانگر تعداد نوترون‌هایی است که از سطح مؤثر این آشکارساز در واحد زمان عبور می‌کند سطح مؤثر آشکارساز مذکور تابعی از انرژی نوترون‌های برخوردکننده به آن است که در انرژی $2/45$ مگا الکترون ولت (انرژی نوترون‌های دوتریم-دوتریم) حدود ۱ سانتی‌متر مربع گزارش شده است [۱۴] لذا می‌توان گفت عدد خوانده شده همان شار نوترون‌های $2/45$ مگا الکترون ولتی است. با توجه به فاصله ۶۰ سانتی‌متر آشکارساز از منبع نوترون می‌توان عدد کل نوترون‌هایی که در کل فضا در واحد زمان پخش می‌شوند را به راحتی با رابطه $N = 4\pi R^2$ محاسبه نمود در این رابطه R فاصله منبع نوترون با

جدول ۱. شار و نرخ تولید نوترون برحسب ولتاژ و جریان‌های مختلف در فشارهای مختلف کاری

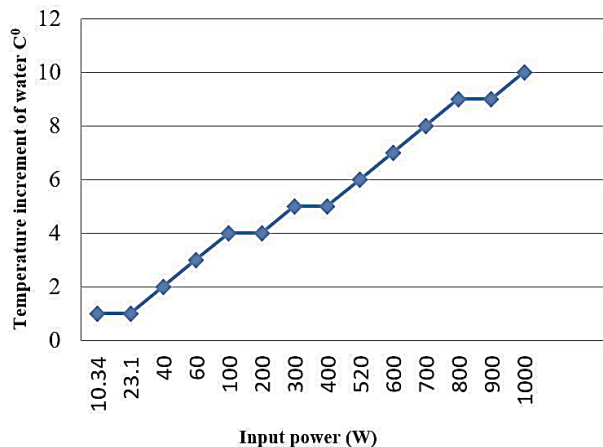
ولتاژ (کیلوولت)	جریان (میلی آمپر)	فشار کاری برحسب 10^{-2} میلی بار	شار نوترون در فاصله ۶۰ سانتی‌متری دستگاه برحسب $n/cm^2.s$	نرخ تولید نوترون ($10^6 n/s$)
۲۰	۱۰۰	۷٫۳	-	-
۲۲	۱۰۰	۶٫۳	-	-
۲۴	۱۰۰	۴٫۵	-	-
۲۴	۱۷	۷٫۳	۰٫۹	۰٫۳۸
۲۵	۱۹	۷٫۸	۱٫۱	۰٫۴۷
۲۶٫۵	۱۸	۷٫۶	۱٫۲	۰٫۵۲
۲۷٫۶	۲۰	۷٫۴	۱٫۱	۰٫۴۷
۲۸٫۴	۱۸	۷٫۲	۲٫۵	۱
۲۹	۲۰	۷٫۲	۱٫۴	۰٫۶



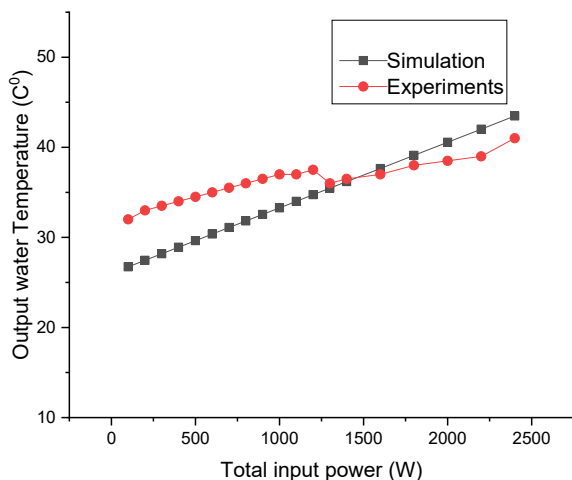
تجربی در محدوده توان ورودی ۱۳۰۰ وات است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با اعمال توان‌های بیشتر از ۳۰۰۰ وات دمای خروجی آب حدود ۵۰ درجه خواهد بود.



شکل ۹. تغییرات دمای آب خروجی از کاتد به مخزن برحسب توان اعمالی (IV) برای گاز کاری دوتریم.



شکل ۱۰. تغییرات دمای اندازه‌گیری شده آب خروجی از کاتد با گاز کاری هلیوم برحسب توان اعمالی (IV).



شکل ۱۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای دمای آب خروجی از کاتد برای گاز هلیوم با در نظر گرفتن شفافیت کاتد.

نتایج اندازه‌گیری‌های مختلف با گاز کاری هلیوم و دوتریم تغییرات دمای آب دوبار یونیزه در الکتروود جدید؛ نسبت به دمای محیط در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایان است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد الکتروود مذکور به خوبی در توان‌های حدود ۱۵۰۰ وات و بالاتر نیز از داغ شدن بیش از حد الکتروود پیشگیری کرده و عملکرد خنک‌کاری خوبی دارد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شفافیت کاتد در نمودار شکل ۱۱ تطبیق مناسبی دارند.

نمودار شکل ۱۰ خلاصه نتایج اندازه‌گیری تغییرات دمای آب خروجی از کاتد برحسب توان اعمالی به آن برای گاز هلیوم را نشان می‌دهد در این نمودار با اعمال تجربی ۱۰ تا ۹۰۰ وات توان به الکتروود کاتد تغییرات دمای آب خروجی از کاتد از ۲ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان داد.

در این کار جریان خوانده شده توسط منبع تغذیه دستگاه IR-IECF که شامل مجموع جریان به الکترون‌ها و یون‌ها است در محدوده ۱۰۰ میلی‌آمپر ثابت نگه داشته شد و توان اعمالی به کاتد با تغییرات ولتاژ کاتد تا محدوده ۲۴ کیلو ولت تغییر داده شد. در این کار دائما فشار گاز کاری دستگاه کاهش داده می‌شد تا جریان ثابت بماند.

برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مقادیر تجربی، نمودار شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی را برای دمای آب برحسب توان جذبی لوله نشان می‌دهد (بدون در نظر گرفتن شفافیت کاتد). نمودار شکل ۱۱ قسمت مشکی‌رنگ همان شبیه‌سازی را برای دمای آب خروجی برحسب توان اعمالی نشان می‌دهد با در نظر گرفتن شفافیت کاتد و به عبارتی شفافیت کاتد محاسبه رابطه ۲ نشان داد که حدود ۱۴٪ توان اعمالی به سطح لوله می‌رسد لذا برای مقایسه بهتر نتایج تجربی و شبیه‌سازی، محور افقی در نمودار شکل ۱۱ حاصل ضرب ولتاژ در جریان اعمالی به کاتد را نشان می‌دهد که در تجربه نیز توسط منبع تغذیه قرائت می‌شود. به طور مثال در نمودار شکل ۱۱ عدد ۲۰۰۰ وات حاصل ضرب ولتاژ در جریان حاصل از رابطه ۲ است. لذا این ۲۰۰۰ وات معادل عدد ۱۴۰ وات در نمودار شکل ۴ است. همچنین دبی آب همان دبی تجربی اندازه‌گیری شده یعنی ۰/۷ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۱ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای دمای آب خروجی از کاتد با به‌کارگیری گاز هلیوم برحسب توان ورودی را با در نظر گرفتن شفافیت کاتد نشان می‌دهد. در این نمودار شفافیت ۸۶ درصدی کاتد (روابط ۱ و ۲) برای جذب انرژی از یون‌ها در نظر گرفته شد. همان‌طور که در این نمودار ملاحظه می‌گردد کمترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج



۶. خلاصه و نتیجه گیری

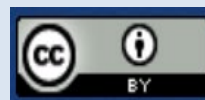
الکتروود کاند در دستگاه‌های الکترواستاتیکی در معرض مستقیم برخورد با یون‌های پرانرژی است؛ لذا در توان‌های بالا بسیار داغ و به مرحله ذوب شدن نیز می‌رسد. برای افزایش زمان کارکرد دستگاه IR-IECF که در توان‌های کاری بالا (معمولاً در محدوده توان‌های بیشتر از ۴۰۰ وات) کاند خطر ذوب شدن داشت؛ در این کار پژوهشی یک کاند با قابلیت آبگرد جهت خنک‌کاری به همراه ورودی ولتاژ بالای مربوطه طراحی و ساخته شده است. برای ساخت این کاند، ابتدا شبیه‌سازی‌های لازم با در نظر گرفتن شرایط کاری دستگاه و با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام گرفت و محدوده سرعت گردش و دبی مورد نیاز سیال خنک‌کننده محاسبه گردید. سپس، پمپ مورد نیاز جهت ایجاد سرعت و دبی محاسبه شده انتخاب گردید. اندازه‌گیری‌های تجربی بعد از نصب و راه‌اندازی الکتروود مذکور تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی داشت و نشان داد این الکتروود قادر است به راحتی تا توان‌های ۳۰۰۰ وات الکتروود کاند را خنک کرده و از ذوب شدن آن پیشگیری نماید. با این طراحی خلاقانه، دستگاه IR-IECF می‌تواند در محدوده توان مذکور به صورت پیوسته و ساعت‌ها بدون مشکل ذوب شدن کاند به کارکرد خود ادامه دهد.

مراجع

- Bhattacharjee D, Mohanty S.R, Adhikari S. Effect of Positive Polarity in an Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device: Electron Confinement, X-ray Production, and Radiography. *Fusion Science and Technology*. 2022.
- Takakura K, Nittoh K, Miyadera H, Yoshioka K, Karino Y, Hotta E, Hasegawa J. Neutron imaging with an inertial electrostatic confinement fusion neutron source. *Applied Optics*. 2022;61(5):1238-1240.
- Bakr M, Mukai K, Masuda K, Yagi J, Konishi S. Characterization of an ultra-compact neutron source based on an IEC fusion device and its prospective applications in radiography. *Fusion Engineering and Design*. 2021;167.
- Sharma S.K, Tewari S.V, Waghmare N, Raju S.J, Rao K.D, Sharma A. Compact inertial electrostatic confinement D-D fusion neutron generator. *Annals of Nuclear Energy*. 2021;159.
- Bowden-Reid R, Khachan J, Wulfkühler J.P, Tajmar M. Evidence for surface fusion in inertial electrostatic confinement devices. *Physics of Plasmas*. 2018;25(11).
- Masuda K, Nakagawa T, Kipritidis J, Kajiwarra T, Yamagaki Y, Zen H, Yoshikawa K, Nagasaki K. Cathode grid current dependence of D(d, n) 3 He reaction rates in an inertial electrostatic confinement device driven by a ring-shaped magnetron ion source. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2010;52(9):95010.
- Park J, Krall N.A, Sieck P.E, Offermann D.T, Skillicorn M, Sanchez A, Davis K, Alderson E, Lapenta G. High-energy electron confinement in a magnetic cusp configuration. *Phys. Rev.* 2015;X5:021024.
- Seltzman A. Design of an actively cooled grid system to improve efficiency in inertial electrostatic confinement fusion reactors. *Georgia Institute of Technology Department of Physics*. 2008.
- Damideh V, Sadighzadeh A, Koochi A, Aslezaem A, Heidarnia A, Abdollahi N, Abbasi Davani F, Damideh R. Experimental Study of the Iranian Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device as a Continuous Neutron Generator. *Journal of Fusion Energy*. 2011.
- Aslezaem A.R, Sedaghat Movahhed M, Bagheri A, Kabir M, Rezaei M. Experiments on a new actively cooled cathode for the inertial electrostatic confinement fusion device to extend the operational time. *Abstract on 1st International & 28th National Conference on Nuclear Science and Technology*. 2022.
- García-Baonza R, Gallego E, Garcia F G.F. Combined application of Berthold LB6411 and WENDI-II rem-meters for neutron area monitoring in D-T neutron generators. *Proceedings of the ISSD*. 2020.
- Aslezaem A.R, Ghafoorifard H, Sadighzadeh A, Movahhed M.S. Preliminary results of a miniature cylindrical inertial electrostatic confinement fusion device equipped with inductively coupled plasma generator. *Journal of Instrumentation*. 2019;14(07):T07007.
- Aslezaem A.R, Ghafoorifard H, Sadighzadeh A. Discharge current enhancement in inertial electrostatic confinement fusion by impulse high magnetic field. *Vacuum*. 2019;166:286-291.
- Bhattacharjee D, Buzarbaruah N, Mohanty S.R. Neutron and x-ray emission from a cylindrical inertial electrostatic confinement fusion device and their applications. *Journal of Applied Physics*. 2021;130:053302.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

اصل زعیم، علیرضا، صداقت موحد، مرتضی، باقری، علی، کبیر، مجتبی، قپانوری، مریم، کارگریان، آمنه. (۱۴۰۳)، طراحی و ساخت کاند با قابلیت خنک شونده برای روش محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی به منظور افزایش زمان کارکرد دستگاه. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱۰(۴)، ۵۸-۶۶.

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1617.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1617>

