



طراحی و ساخت دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای به روش محصورسازی الکترواستاتیکی (IECF) جرمی

وحید دامیده*، اصغر صدیق‌زاده، نیره عبداللهی، اردوان کوهی، علی حیدرنیا، علی‌رضا اصل‌زعیم، علی باقری، سعید خادم‌زاده، فاطمه کاظمی‌زاده، حمید مهدی‌پور، مرتضی صداقت، محمود ترابی، مجتبی کبیر
پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله، به طراحی و ساخت دستگاه هم‌جوشی به روش محصورسازی الکترواستاتیکی جرمی، که شار نوترونی پیوسته‌ی آن به روش محصورسازی الکترواستاتیکی جرمی تولید می‌شود، پرداخته شده است. این دستگاه از یک محفظه‌ی خلاء استوانه‌ای شکل از جنس فولاد ضدزنگ به قطر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر ساخته شده است. در داخل این محفظه، دو الکترود کروی هم‌مرکز از جنس فولاد ضدزنگ به قطرهای ۱۳/۵ و ۴۱ سانتی‌متر قرار دارد. در اثر تخلیه‌ی الکتریکی در گاز دوتریم در محدوده‌ی فشاری 10^{-2} تا 10^{-3} میلی‌بار، پلاسما‌ی چگال تشکیل شده در ناحیه‌ی مرکز دو کره کاملاً قابل مشاهده است. با تزریق گاز دوتریم به درون این دستگاه، واکنش هم‌جوشی D-D انجام می‌گیرد. آشکارسازهای گایگر با پوشش ایندیم، آشکارساز ردپای نوترون و Neutron RAE II در هر ثانیه به طور متوسط بیش از 10^6 نوترون بر ثانیه را ثبت کردند. هم‌چنین دز نوترونی $100 \mu\text{Sv/h}$ با استفاده از دزیومتر LB6411 اندازه‌گیری شد.

کلید واژه‌ها: هم‌جوشی هسته‌ای، تخلیه‌ی الکتریکی، مولد نوترون، محصورسازی الکترواستاتیکی جرمی

Design and Construction of Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device (IECF)

V. Damideh*, A. Sadighzadeh, N. Abdollahi, A. Koochi, A. Heidarnia, A. Aslezaem, A. Bagheri, S. Khademzadeh,
F. Kazemzadeh, H. Mehdipour, M. Sedaghat, M. Torabi, M. Kabir
Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Abstract: In this paper, design and construction of an IECF device which produces continuous neutron flux by the inertial electrostatic confinement fusion is reported. The device is a stainless steel cylindrical chamber of 60cm in height and 60cm in diameter. Inside the chamber two concentric stainless steel-made spherical electrodes of 13.5cm and 41cm in diameter were installed. At a deuteron gas pressure in the range of 10^{-3} to 10^{-2} mbar a condensed plasma during the electric discharge at the central part of two sphere was observed due to the D-D fusion reaction. By using a neutron track detector and a GM counter covered by indium foil, a neutron flux of more than 10^6 n/S was recorded. In this respect, a neutron dose rate of $100 \mu\text{Sv/h}$ by the use of LB6411 neutron dosimeter was also detected.

Keywords: Nuclear Fusion, Electric Glow Discharge, Neutron Generator, Inertial Electrostatic Confinement

*email: vdamideh@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۴/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۲۴

۱. مقدمه

محصولسازی الکتروستاتیکی جرمی یکی از روش‌های رسیدن به هم‌جوشی هسته‌ای می‌باشد. در این روش، یون‌های تولید شده بر اثر تخلیه‌ی الکتریکی در فشار پایین، بین دو الکتروود کروی مشبک شتاب داده می‌شوند. یون‌ها به سمت مرکز الکتروود کروی شتاب گرفته و در اثر برخوردهای پی در پی در مرکز کره، انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای را سبب می‌شوند. سهولت کار با دستگاه هم‌جوشی به روش محصولسازی الکتروستاتیکی جرمی^(۱) (IECF)، اندازه‌ی نسبتاً کوچک و قیمت پایین آن نسبت به سایر روش‌ها و دستگاه‌های پرهزینه‌ی هم‌جوشی هسته‌ای، مانند دستگاه توکامک و هم‌جوشی لیزری، این دستگاه را به بهترین دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای برای رسیدن به کاربردهای مختلفی هم‌چون تولید ایزوتوپ‌های نایاب کربن، به ویژه ^{11}C ، تولید رادیوداروهای PET، چشمه‌ی نوترونی، ردیابی مواد منفجره‌ی پیشرفته‌ی پلاستیکی و امکان استفاده از آن به عنوان دستگاه کوچک تولید توان الکتریکی، تبدیل می‌کند.

دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای به روش محصولسازی الکتروستاتیکی جرمی، به مقاله‌ای که توسط مخترع تلویزیون در سال ۱۹۵۰ ارائه شد، برمی‌گردد [۱]. براساس نظر وی، شتاب دادن باریکه‌های الکترونی و کانونی کردن آن‌ها در مرکز کره، باعث می‌شود که برخوردهای متعددی بین الکترون‌ها و مولکول‌های خنثای ماتریس، روی دهد. یون‌هایی که در اثر این برخوردها به وجود می‌آیند، شتاب گرفته و خود عامل برخوردهای دیگری می‌شوند. این برخوردها مقدمات انجام فرایند هم‌جوشی هسته‌ای را فراهم می‌کنند. تحقیقات نظری انجام شده در مورد تعادل و پایداری پلاسمای ایجاد شده به این روش، نشان می‌دهد که چگالی پلاسمای تشکیل شده در مرکز کره، برای ایجاد هم‌جوشی هسته‌ای، به اندازه‌ی کافی بالا نیست [۲]. در سال ۱۹۶۰ استفاده از باریکه‌های یونی به جای باریکه‌های الکترونی پیشنهاد شد و با استفاده از مخلوط گازی دوتریم-تریتیم، آهنگ تولیدی برابر با 10^9 نوترون در ثانیه برای نوترون، گزارش شد [۳]. اولین دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای پیوسته به روش IECF، در آزمایشگاه ITT ایالات متحده‌ی آمریکا، در سال ۱۹۶۷ طراحی و ساخته شد، که در آن از شش چشمه‌ی یونی پرانرژی، برای ایجاد برخوردهای باریکه-باریکه برای تولید

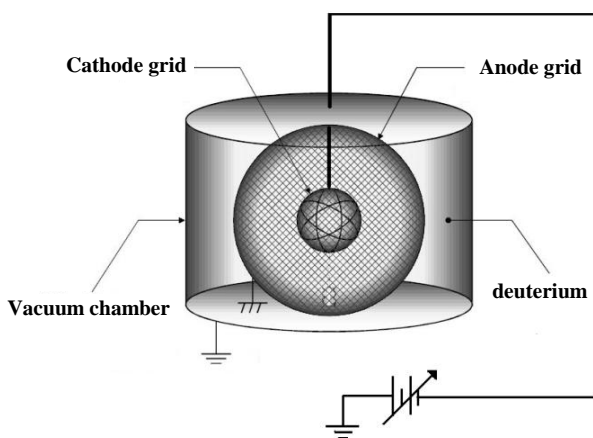
پلاسمای چگال، استفاده شد. در آن سال با این روش و با استفاده از گازهای D-D و D-T، به رکورد تولید به ترتیب 10^8 و 10^{10} نوترون در ثانیه رسیدند [۴].

متأسفانه تا به حال، جزئیات دقیقی از چگونگی انجام واکنش‌های هم‌جوشی، در این دستگاه ارائه نشده است. اما آنچه مسلم است، کاربرد فراوان این دستگاه در پزشکی، برای تشخیص و درمان انواع سرطان‌ها (BNCT) و تشخیص آلزایمر با استفاده از رادیویازوتوپ‌ها و هم‌چنین کاربرد گسترده‌ی آن در کشف و ردیابی مواد پرتوزا و مواد منفجره‌ی پیشرفته‌ی پلاستیکی، با استفاده از فعال‌سازی نوترونی است به طوری که از سال ۲۰۰۱ به بعد سرمایه‌گذاری‌های کلانی در استفاده‌های پزشکی و ضدتروریستی از این دستگاه شده است [۵].

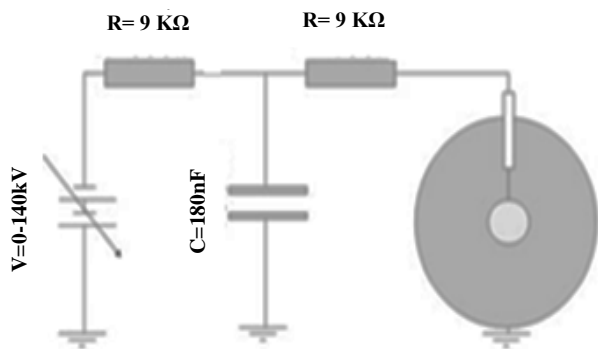
هدف این مقاله طراحی و ساخت دستگاه IECF و کارکرد تجربی آن برای انجام فرایند هم‌جوشی هسته‌ای پیوسته می‌باشد.

۲. روش کار

ساختمان دستگاه IECF در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه از یک محفظه‌ی خلاء استوانه‌ای شکل به قطر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و از جنس فولاد ضدزنگ ساخته شده است. در داخل این محفظه، دو الکتروود کروی قرار دارد. الکتروودهای این دستگاه از چند سیم فولادی حلقوی ضدزنگ به قطر ۱ میلی‌متر، به صورت مشبک، ساخته شده‌اند به طوری که قطر آند ۴۱ سانتی‌متر و قطر کاتد ۱۳/۵ سانتی‌متر است.



شکل ۱. ساختمان دستگاه IECF

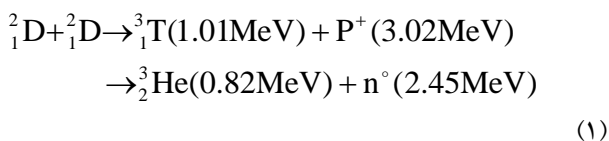


شکل ۳. مدار الکتریکی دستگاه IECF.

در اثر تخلیه الکتریکی در گاز، یون‌های ایجاد شده در اثر برخورد در میدان الکتریکی بین دو کره، به طرف مرکز کره‌ها، به طور هم‌گرا شتاب می‌گیرند، در حالی که الکترون‌ها، به سمت بیرون کره‌ها به طور واگرا شتاب می‌گیرند. وقتی فشار به حد کافی پایین آورده شد، برخوردهای یون-یون قبل از رسیدن به نواحی مرکزی کره‌ها به صفر میل می‌کنند. وقتی یون‌ها به مرکز کره‌ها می‌رسند، در اثر برخوردهای متوالی با یک‌دیگر و نیز با اتم‌های ماتریس ناحیه پلاسمایی داغی را به وجود می‌آورند که زمینه را برای انجام هم‌جوشی هسته‌ای پیوسته، با گاز دوتریم فراهم می‌آورد. شکل ۴ تصویری از ناحیه پلاسمای چگال در مرکز کره‌ها است.

دمای ناحیه پلاسمای چگال به قدری بالا است که پس از قطع تخلیه الکتریکی، برای دقایقی کره‌ی سیمی فولادی به رنگ قرمز ملتهب دیده می‌شود. با کوچک‌ترین عدم تقارن در کره‌ی داخلی و بیرونی، جت الکترونی تولید شده و موجب ذوب شدن کره بیرونی می‌شود که در نتیجه از چگالی پلاسمای تشکیل شده می‌کاهد. شکل ۵ جت الکترونی تشکیل شده در حین انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای و شکل ۶ قسمتی از کره‌ی بیرونی را که در حال ذوب شدن است، نشان می‌دهد.

در مدت انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای D-D، تعداد بیش از 10^6 نوترون به انرژی 2.45MeV در هر ثانیه به صورت پیوسته مشاهده شد.

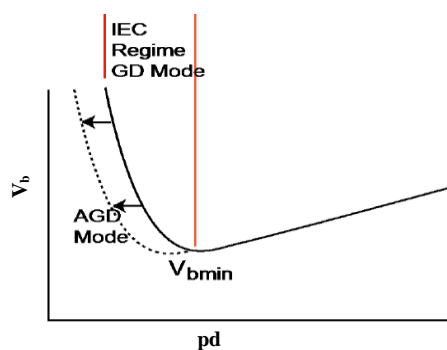


آند دستگاه به وسیله سه پایه فلزی در محفظه‌ی خلاء قرار می‌گیرد و با اتصال یک تسمه‌ی مسی به محفظه‌ی خلاء، زمین می‌شود. برای ساخت ورودی فشار قوی دستگاه IECF از شیشه‌ی کوارتز استوانه‌ای شکل و برای ساخت نارسانای ورودی فشار قوی از PTFE استفاده شده است. برای اعمال ولتاژ، در داخل ورودی فشار قوی از سیم تنگستن استفاده شده است که یک سر آن به کابل فشار قوی منبع تغذیه، و سر دیگر آن به کاتد دستگاه وصل می‌شود. محفظه‌ی خلاء توسط یک پمپ خلاء توربومولکولی تا فشار 10^{-6} میلی‌بار خلاء می‌شود. گاز دوتریم در محدوده‌ی فشاری 10^{-2} تا 10^{-3} میلی‌بار به داخل محفظه تزریق می‌شود. تخلیه الکتریکی در ناحیه‌ی چپ منحنی پاشن (شکل ۲)، توسط مدار الکتریکی دستگاه IECF (شکل ۳) بین دو الکتروود کروی برقرار می‌شود.

جریان در مدار الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین هر دو نقطه‌ی آن توسط تابلوی کنترل منبع تغذیه اندازه‌گیری می‌شود.

۳. نتایج تجربی

تخلیه الکتریکی در گاز دوتریم در ولتاژ ۱۵ تا ۱۴۰ کیلوولت با جریانی از مرتبه ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌آمپر، انجام شد. البته شروع تخلیه الکتریکی، همان‌سان که از منحنی پاشن در شکل ۳ برمی‌آید، به طور قابل ملاحظه‌ای به فشار گاز وابسته است [۶]. هر چه فشار گاز پایین‌تر می‌رود، شروع تخلیه الکتریکی یا همان ولتاژ شکست گاز، افزایش می‌یابد. برای سهولت کار ابتدا فشار گاز تا آن جا بالا برده می‌شود که شکست الکتریکی در گاز روی دهد. سپس فشار گاز پایین آورده می‌شود تا این که پلاسمای چگالی در مرکز کره محصور شود. در ولتاژ ثابت با افزایش جریان تخلیه الکتریکی، شدت نور گسیلیده از ناحیه پلاسمای چگال افزایش می‌یابد. این افزایش در ناحیه مرئی با چشم غیر مسلح، قابل تشخیص است.



شکل ۲. منحنی پاشن؛ ولتاژ شکست گاز بر حسب فشار در فاصله‌ی بین دو الکتروود.

در حین انجام این آزمایش‌ها با استفاده از شمارگرهای گایگر مولر، آشکارساز رد پای نوترون و Neutron RAE II جای داده شده در کنار محفظه‌ی خلاء دستگاه IECF تعداد نوترون‌ها شمارش شد. نتیجه‌ی این شمارش، در جدول ۱ داده شده است. هم‌چنین با استفاده از LB6411 دز نوترون حدود $100 \mu\text{Sv/h}$ اندازه‌گیری شد.

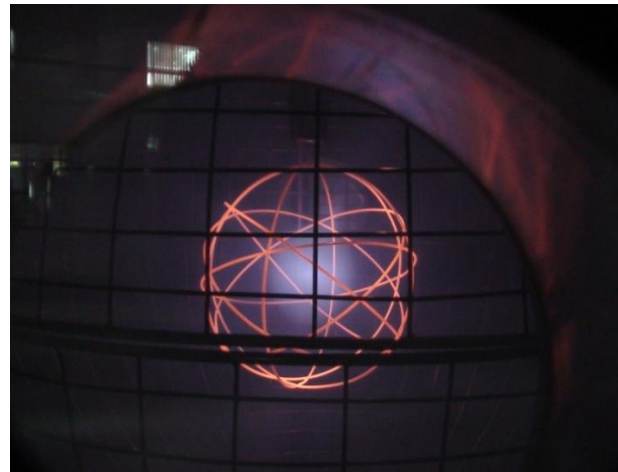
یکی از مشکلات اساسی این آزمایش، انتقال ولتاژ فشار قوی به داخل محفظه و اتصال آن به کاتد، پس از عبور از سطح آند بود. اگر برای ورودی فشار قوی از لوله تفلونی استفاده می‌شد، به دلیل خزش سطحی جریانی در فشار پایین از سطح تفلون، به میزان زیادی از چگالی پلاسمای مرکزی کاسته می‌شد. اگر از لوله‌ی پیرکس استفاده می‌شد، به دلیل نزدیکی روکش کابل به ناحیه‌ی دما بالا یعنی نزدیکی سطح کاتد به پلاسمای مرکزی، روکش کابل در اثر دمای بالا تبخیر شده و باعث می‌شد که خلاء پایین حاصل نشود. حتی اگر به جای کابل از سیم استیل استفاده می‌شد، موجب سوراخ شدن پیرکس در ولتاژهای بالا می‌گردید. در دستگاه IECF از شیشه کوارتز استفاده شد.

۴. نتیجه‌گیری

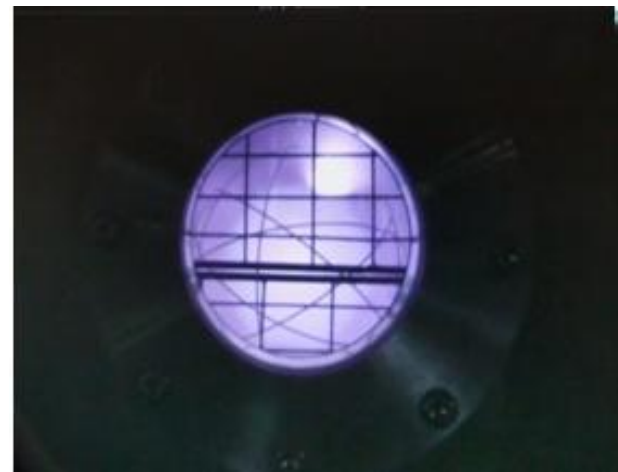
در این مقاله نتایج طراحی و ساخت دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای و نتایج تجربی برای گاز دوتریم ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که به روش IECF می‌توان با ایجاد یک توده پلاسمای چگال در مرکز کره و تزریق گاز دوتریم به داخل آن، موجبات انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای پیوسته را فراهم آورد. با استفاده از این روش می‌توان با صرف کم‌ترین هزینه و انرژی، واکنش هم‌جوشی هسته‌ای را به صورت پیوسته، هم به عنوان چشمه‌ی نوترون و هم به صورت ایزوتوپ‌های خاص القا کرد. در حال حاضر دستگاه IECF طراحی و ساخته شده به عنوان مولد نوترون از کاربردهای وسیعی برخوردار است.

جدول ۱. تعداد نوترون شمارش شده برای دستگاه IECF در شرایط مختلف

تعداد نوترون (s^{-1})	فشار (mbar)	جریان (mA)	ولتاژ (kV)
9×10^5	7.4×10^{-3}	70	105
1.04×10^6	5.4×10^{-3}	115	123
1.07×10^6	4.6×10^{-3}	122	128



شکل ۴. ناحیه‌ی پلاسمای چگال در گاز دوتریم.



شکل ۵. جت الکترونی.



شکل ۶. ذوب شدن قسمت کوچکی از کره‌ی بیرونی در اثر برخورد جت الکترونی و تبدیل آن به تفنگ الکترونی.



۱. IECF: Inertial Electrostatic Confinement Fusion

References:

1. P.T. Farnsworth, Electric Discharge, "Device for producing interactions between nuclei," U.S. Patent 3, 258, 402 (1966).
2. William C. Elmore, "On the inertial electrostatic confinement of plasma," *Physics of Fluids*, 2, 239-246 (1959).
3. Robert L. Hirsch, "Inertial electrostatic confinement of ionized fusion gases," *Journal of Applied Physics*, 38, 11, 4522-4534 (1967).
4. L. Kulcinski, "The united states IEC program," pp 5th US-Japan IEC Workshop (2002).
5. K. Yoshikawa, "Research and development of the humanitarian landmine detection system by a compact fusion neutron source," *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* (2007).
6. Kunihiro Yamauchi, "Neutron production characteristics and emission properties of spherically convergent beam fusion," Tokyo Institute of Technology, Yokohama Kanagawa 226-8502, Japan (2001).