



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بررسی ناحیه احتراق همجوشی سوخت $P-^{11}B$ با در نظر گرفتن اثرات نسبیتی

سیده نسرین حسینی مطلق^۱؛ عبدالرسول قرائتی^۲؛ جواد بهمنی^۳

^۱گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز

^{۲،۳}گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور

چکیده:

در این مقاله جهت تعیین ناحیه احتراق سوخت $P-^{11}B$ توان همجوشی، توان برمشترالانگ و آهنگ انتقال انرژی بین الکترونها و یونها با در نظر گرفتن اثرات نسبیتی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر این ناحیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ناحیه احتراق این سوخت به طور مطلوب در دمای یون بین $400\text{keV} - 300\text{keV}$ و دمای الکترون کمتر از 100keV بدست می‌آید و کاهش لگاریتم کولنی به مقدار $\ln\Lambda = 5$ عملکرد سوخت را تا حدی بهبود می‌بخشد و با انتخاب نسبت چگالی عددی بورن به پروتون برابر مقدار 0.2 ، توان اتلافی برمشترالانگ سوخت به حداقل ممکن می‌رسد.

کلمات کلیدی: احتراق، همجوشی، اثرات نسبیتی، برمشترالانگ، انتقال انرژی

۱- مقدمه

امروزه بیشترین مطالعات راکتور همجوشی در مورد سوخت D-T انجام شده است. این واکنش دارای بیشترین سطح مقطع همجوشی (برابر ۵ بارن) در پایین‌ترین انرژی (تقریباً 10keV در سیستم مرکز جرم) در بین دیگر سوختهای همجوشی می‌باشد. این سطح مقطع بزرگ و انرژی مرکز جرم پایین، منجر به کمترین شرایط لازم برای احتراق و بالاترین چگالی توان همجوشی در فشار ثابت پلاسما می‌شود. اما این سوخت دارای دو مشکل عمده برای طراحان راکتور شامل تولید نوترونها با انرژی 14Mev و حضور تریتیوم در سیکل سوخت می‌باشد. این نوترونها با صدمه زدن به اجزای راکتور ضمن کاهش عمر مفید آنها، با اکتیو کردن مواد باعث تولید حجم زیادی از پسماند رادیواکتیو در راکتور می‌شود و از طرف دیگر وجود پوشش لیتیوم برای تولید تریتیوم باعث پیچیدگی، هزینه اضافی و ایجاد فضای شعاعی زیاد در راکتور می‌شود. به این خاطر سوختهای پیشرفته شامل $D-^3\text{He}$ ، $^3\text{He}-^3\text{He}$ ، $^6\text{Li}-P$ ، $^{11}B-P$ به منظور تولید خیلی کمتر نوترون و تابش رادیواکتیو نسبت به سوخت D-T بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در بین این سوختها، سوخت $P-^{11}B$ در سال ۱۹۳۰ برای اولین بار توسط رادرفورد و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]. واکنش اصلی این سوخت به صورت $P+^{11}B \rightarrow 3^4_2\text{He} + 8.7\text{Mev}$ می‌باشد و همه انرژی از طریق ذره باردار تولید می‌شود و میزان تابش رادیواکتیو به حداقل ممکن می‌رسد و امکان تبدیل مستقیم انرژی ذرات باردار به انرژی الکتریکی با بازدهی خیلی بالا (بیشتر از ۸۰٪) از مزایای دیگر این



بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان

سوخت می‌باشد [۲]. در دماهای بالا آهنگ واکنش همجوشی سوخت $P-^{11}B$ با واکنش $D-T$ قابل مقایسه است و لذا بررسی ناحیه احتراق این سوخت با در نظر گرفتن اثرات نسبیتی و شناخت عوامل مؤثر بر آن جهت همجوشی دو ذره ^{11}B و P از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله ابتدا در قسمت ۲ متوسط راکتیویته (آهنگ واکنش پذیری) واکنش $P-^{11}B$ بررسی می‌شود. در قسمت ۳ با بررسی آهنگ انتقال انرژی بین الکترونها و یونها، توان اتلافی تابش برمشترالانگ و توان همجوشیبه عنوان پارامترهای مهم و تأثیر گذار، ناحیه احتراق سوخت $P-^{11}B$ مشخص می‌شود و در قسمت ۴ نتایج و در پایان در قسمت ۵ بحث و نتیجه گیری ارائه می‌گردد.

۲- محاسبه متوسط راکتیویته واکنش $P-^{11}B$

راکتیویته (آهنگ واکنش پذیری) به صورت احتمال واکنش بر واحد زمان و چگالی هسته به صورت σv تعریف می‌شود که σ احتمال واکنش و v سرعت نسبی هر دو ذره واکنش کننده در همجوشی سوخت می‌باشد. ما می‌توانیم متوسط راکتیویته (بر حسب cm^3/s) برای واکنش $P-^{11}B$ از طریق رابطه زیر محاسبه کنیم [۳].

$$\langle \sigma v \rangle_{P-^{11}B} = C_1 \zeta^{-\frac{5}{6}} \xi^2 \exp\left(-3\zeta^{\frac{1}{3}} \xi\right) + 5.41 \times 10^{-15} T^{-\frac{3}{2}} \times \exp(-148/T) \quad (1)$$

که ζ و ξ به ترتیب به صورت $\zeta = 1 - \frac{C_2 + C_4 T^2 + C_6 T^3}{1 + C_3 T + C_5 T^2 + C_7 T^3}$ و $\xi = \frac{C_0}{T^{\frac{1}{3}}}$ تعریف می‌شوند و مقادیر ثابت C_0 تا C_7 به ترتیب برابر $C_0 = 17/708$ ، $C_1 = 6382 \times 10^{-16}$ ، $C_2 = -59/357 \times 10^{-3}$ ، $C_3 = 201/65 \times 10^{-3}$ ، $C_4 = 1/0.404 \times 10^{-3}$ ، $C_5 = -0/00098305 \times 10^{-3}$ و $C_6 = -0/00091653 \times 10^{-3}$ ، $C_7 = 2/7621 \times 10^{-3}$ می‌باشند.

۳- آهنگ انتقال انرژی بین الکترونها و یونها، توان اتلافی برمشترالانگ و توان همجوشی درواکنش $P-^{11}B$

مهمترین عاملی که عملکرد سوخت $P-^{11}B$ در پلاسما متعادل محدود می‌کند تابش برمشترالانگ الکترونها است که بوسیله برخورد آنها با یونها و یا با دیگر الکترونها بوجود می‌آید. اتلافهای انرژی ناشی از فرار ذرات از طریق بهبود سیستم محصورسازی بهبود می‌یابد. در واکنش $P-^{11}B$ آهنگ انتقال انرژی بین الکترونها و یونها (بر حسب W/cm^3) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$P_{ie} = 7.61 \times 10^{-28} \times n_e \sum_i \frac{Z_i^2 n_i \ln \Lambda}{\mu_i T_e^{\frac{3}{2}}} \left(1 + \frac{m_e T_i}{m_i T_e}\right)^{-\frac{3}{2}} \left(1 + \frac{0.3 T_e}{m_e c^2}\right) (T_i - T_e) \quad (2)$$

که اثرات نسبیتی نیز لحاظ شده است [۶، ۵]. در این فرمول T دما و $m_e c^2$ انرژی سکون الکترون بر حسب ev ، $m_i = \mu_i m_p$ جرم یون بر حسب جرم پروتون m_p و n_e چگالی عددی الکترون بر حسب cm^{-3} است. لگاریتم



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

کولنی به صورت $\ln \Lambda \approx 24 - \ln \left(\frac{\sqrt{n_e}}{T_e} \right)$ تعریف می شود که T_e دمای الکترون بر حسب keV و n_e بر حسب cm^{-3} است [۷]. به منظور محاسبه مطلوبی نیمم توان اتلافی از دیگر منابع گرمایش الکترون، به جز اصطکاک کولنی با یونها، صرف نظر می شود. قابل توجه است که در یک راکتور واقعی، الکترونها همچنین از طریق سیستم های گرمایشی خارجی، اصطکاک با تولیدات همجوشی و دیگر منابع گرم می شوند. در نتیجه دمای الکترونها و اتلافهای برمشترالانگ بزرگتر از مقدار محاسبه شده می باشند. رابطه چگالی توان اتلاف برمشترالانگ (بر حسب W/cm^3) با در نظر گرفتن اثرات نسبیته به صورت زیر است [۹،۸]:

$$P_B = 1.62 \times 10^{-32} \times n_e^2 \sqrt{T_e} \left\{ \sum_i \frac{Z_i^2 n_i}{n_e} \left[1 + 0.7936 \frac{T_e}{m_e c^2} + 1.874 \left(\frac{T_e}{m_e c^2} \right)^2 + \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{T_e}{m_e c^2} \right] \right\} \quad (3)$$

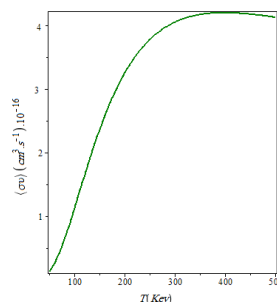
اگر هیچ گونه مکانیسم اتلاف انرژی دیگر برای الکترونها وجود نداشته باشد می نیمم اتلاف مربوط به آنها ناشی از تابش برمشترالانگ است که با رابطه $P_{ie}(T_e, T_i) = P_B(T_e)$ دمای الکترون T_e ، برابر $30 keV$ محاسبه می شود و لذا دمای الکترون (یا دو سوم میانگین انرژی الکترون، اگر الکترونها غیر ماکسولی باشند) باید در انرژی پایین نگه داشته شود. نتایج مقدار اتلاف برمشترالانگ با توان همجوشی P_f قابل مقایسه است به طوری که وقتی دو شاخص یون i_1 و i_2 با $Z_{i_1} = 1$ وجود داشته باشد در این صورت چگالی توان همجوشی (بر حسب W/cm^3) به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$P_f = 1.602 \times 10^{-19} n_{i_1} n_{i_2} \langle \sigma v \rangle_f E_f = 1.602 \times 10^{-19} \frac{\epsilon}{(5\epsilon+1)^2} n_e^2 \langle \sigma v \rangle_f E_f \quad (4)$$

که $\langle \sigma v \rangle_f$ متوسط راکتیویته واکنش (بر حسب cm^3/s)، E_f انرژی آزاد شده (بر حسب ev) در هر واکنش همجوشی است. تجربیات و کارهای تئوری اخیر نشان می دهد که بدست آوردن انرژی یون بیشتر از $100 keV$ و می نیمم نمودن توان برمشترالانگ، که دو چالش مهم در مورد سوخت $P-^{11}B$ هستند، با وسیله کانون پلاسما چگال امکان پذیر است [۱۰].

۴- نتایج

نمودار ۱ نشان می دهد با افزایش دما متوسط راکتیویته سوخت $P-^{11}B$ افزایش می یابد و در دمای رزونانس $400 keV$ دارای بیشترین مقدار راکتیویته است.



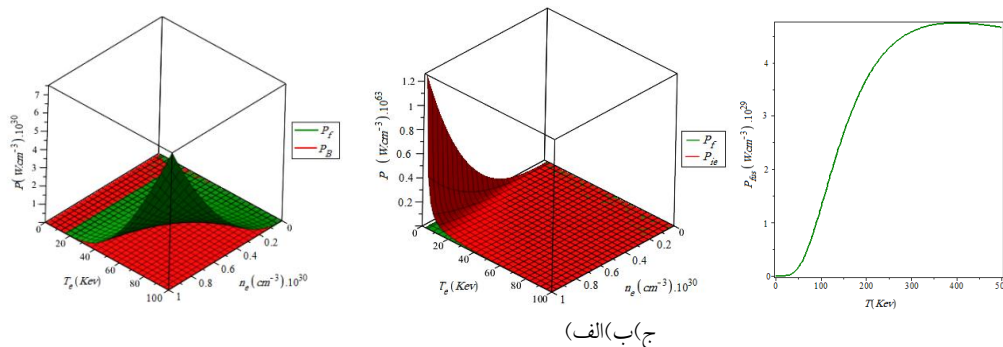
نمودار ۱- تغییرات متوسط راکتیویته واکنش $P-^{11}B$ بر حسب دما



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نمودار ۲ (الف) نشان می‌دهد که توان همجوشی سوخت $P-^{11}B$ با افزایش دمای الکترون افزایش می‌یابد و ماکزیمم مقدار P_f در دمای رزونانس 400 keV رخ می‌دهد. از نمودار ۲ (ب) مشاهده می‌شود که مقدار P_{ie} با افزایش چگالی عددی و کاهش دمای الکترون (با فرض $T_i = 200\text{ keV}$ و $\epsilon = \frac{n_B}{n_p} = 0.2$) افزایش می‌یابد. همچنین از نمودار ۲ (ج) می‌بینیم که با افزایش چگالی عددی الکترون و دمای الکترون مقدار توان اتلافی برمشترالانگ P_B ، افزایش می‌یابد و در دمای الکترون برابر 300 keV توان همجوشی از توان برمشترالانگ بزرگتر است که با مقدار محاسبه شده در قسمت قبل مطابقت دارد.



نمودار ۲ - (الف) چگالی توان همجوشی بر حسب دما با $\epsilon = 0.2$ و $n_e = 1.3 \times 10^{29}\text{ cm}^{-3}$ (ب) آهنگ انتقال انرژی الکترون- یون و توان همجوشی بر حسب چگالی عددی و دمای الکترون (ج) توان اتلاف برمشترالانگ و توان همجوشی بر حسب چگالی عددی و دمای الکترون برای سوخت $P-^{11}B$ با $\epsilon = 0.2$

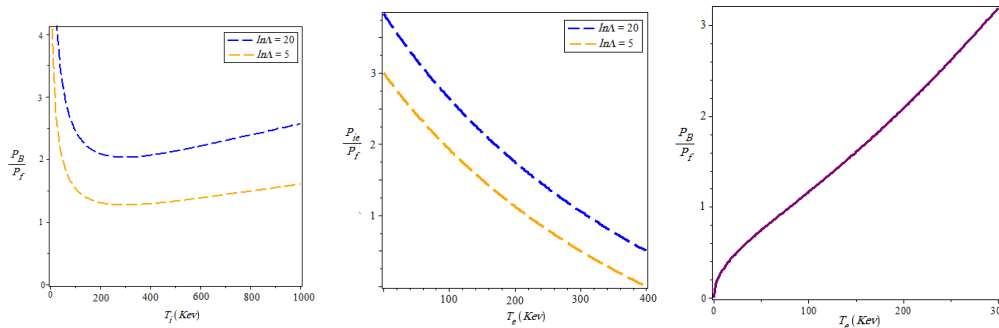
همچنین ماکزیمم مقدار مجاز دمای الکترون برای اتلاف برمشترالانگ ارائه شده با مقایسه نسبت توان برمشترالانگ معادله (۳) با توان همجوشی معادله (۴) نیز قابل محاسبه است. نمودار ۳ (الف) نشان می‌دهد که نسبت $\frac{P_B}{P_f}$ با افزایش دمای الکترون افزایش می‌یابد و لذا به منظور محدود نمودن اتلاف برمشترالانگ به مقدار قابل قبول، دمای الکترون، T_e ، باید کم باشد. همچنین آهنگ انتقال انرژی الکترون- یون معادله (۲) ممکن است مستقیماً با توان همجوشی معادله (۴) مقایسه شوند. نمودار ۳ (ب) نشان می‌دهد مقدار $\frac{P_{ie}}{P_f}$ با افزایش دمای الکترون و کاهش لگاریتم کولنی کاهش می‌یابد. در نمودار ۳ (ج) مشاهده می‌شود که عملکرد مطلوب دمای یون بین 300 keV و 400 keV ، بسته به مقدار دقیق لگاریتم کولنی رخ می‌دهد. می‌نیمم کسر اتلاف برمشترالانگ برای $\ln\Lambda = 20$ در دمای $T_i = 300\text{ keV}$ دارای مقدار $\frac{P_B}{P_f} = 2/1$ و برای $\ln\Lambda = 5$ برابر $\frac{P_B}{P_f} = 1/2$ در دمای حدود $T_i = 400\text{ keV}$ است. بررسی‌ها و محاسبات نشان می‌دهند وقتی که ترکیب سوخت $P-^{11}B$ تغییر می‌کند شدت نسبی اتلاف برمشترالانگ به ازای $\epsilon = 0.2$ به می‌نیمم مقدار می‌رسد. با این وجود در این نقطه عملکرد مطلوب، حتی با $\ln\Lambda = 5$ ، توان اتلاف برمشترالانگ از توان همجوشی بیشتر است. بنابراین سوخت $P-^{11}B$ در هر دما احتراق رخ



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نمی‌دهد و و اگر دما الکترون و یون با هم برابر باشند سوختگی خود نگهدار غیرممکن است. تنها راه ممکن برای چنین واکنش‌ها به نظر می‌رسد نیاز به ایجاد شرایط غیر ماکسولی و نسبت دمای یون به الکترون زیاد است .



الف (ب (ج)

نمودار ۳- الف) نسبت توان برمشترالانگ به توان همجوشی بر حسب دمای الکترون (ب) نسبت آهنگ انتقال انرژی الکترون- یون به توان همجوشی بر حسب دمای الکترون و $T_i = 300 \text{ keV}$ (ج) نسبت توان برمشترالانگ به توان همجوشی بر حسب دمای یون برای $\ln\Lambda = 5$ و $\ln\Lambda = 20$ با $\epsilon = 0.2$ از تساوی $P_{ie} = P_B$ تعیین شده است)

۵- بحث و نتیجه گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهند که توان همجوشی ، آهنگ انتقال انرژی بین الکترون‌ها و یون‌ها و توان اتلافی برمشترالانگ در سوخت $P-^{11}B$ ، با در نظر گرفتن اثرات نسبیتی ، به چگالی عددی الکترون‌ها و دمای الکترون‌ها و یونها بستگی دارد . به علاوه آهنگ انتقال انرژی بین الکترون‌ها و یون‌ها به لگاریتم کولنی نیز وابسته است و این پارامتر برای طراحان راکتور از اهمیت بسزایی برخوردار است. بستگی به مقدار لگاریتم کولنیدر سوخت ، ناحیه احتراق به طور مطلوب در دمای یون بین 300 keV و 400 keV و دمای الکترون کمتر از 100 keV بدست می‌آید و کاهش لگاریتم کولنی به مقدار $\ln\Lambda = 5$ باعث بهبود در عملکرد سوخت می‌گردد . حداقل نمودن توان اتلافی برمشترالانگ علاوه بر انتخاب نسبت چگالی عددی بورن به پروتون برابر مقدار 0.2 ، می‌توان جهت انجام این کار و همچنین کسب انرژی یون بیشتر از 100 keV ، که دو چالش مهم در مورد سوخت $P-^{11}B$ هستند ، از وسیله کانون پلاسما چگال استفاده نمود.

مراجع

- [1] M.Oliphant and L. Rutherford , "Experiments on the Transmutation of Elements by Proton", Proc.R.Soc.A 141 259 (1933)
- [2] G. H. Mily, "Use of a plasma focus device for space propulsion", Advanced SEI Technologies Conference ,AIAA-91-3617 (1991)
- [3] W.M .Nevins, A. Swain , "Nuclear fusion reactions", Fusion Energy, 17,2,52-65 (2000)



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [4] L. Spitzer, Monthly Notices ,Royal Astronomical Society 100,396 (1940)
- [5] J. M. Dawson, " Advanced Fuel Reactors", In Fusion Volume 1, Magnetic Confinement Part B (1981)
- [6] J. G. Cordey , "Theory of Magnetically Confined Plasma" , Proceedings of course and workshop, Varenna,Italy,P.307 (1977)
- [7] D. L. Book ,NRL Plasma Formulary ,Naval Research Laboratory ,Washington , Revised (1987).
- [8] J. R .McNally, "Physics of Fusion Fuel Cycles" . Nuclear TechnologyFusion 2 9-28 (1982)
- [9] S. Maxon, "Bremsstrahlung Rate and Spectra from a Hot Gas (Z=1)",Physical Review A5 ,1630-1633 (1972)
- [10]J.Lerner,"Prospects for P¹¹B fusion with the dense plasma Focus", LawrencevillePlasmaPhysics, NJ 08648,USA,5 (2002)