بهینه انرژی تزریق باریکه پروتون برای واکنش همجوشی p-^{6}Li در راکتور توکامک

INC29-1018

جواد بهمنی[1]

گروه فیزیک ، دانشگاه پیام نور ، صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران ، ایران

چکیده:

در وضعیت کنونی ، تحقیقات توکامک در راستای ایجاد شرایط پلاسمایی است که از آن بتوان به توان گرماهسته‌ای قابل توجهی با بهره انرژی بالا دست یافت.در راکتور توکامک با گرمایش تزریق باریکه خنثی ، تعیین انرژی بهینه برای داشتن ضربب تکثیر انرؤی بالا از اهمیت به سزایی برخوردار است . بررسی ها نشان می‌دهد در چنین راکتور، انرژی بهینه باریکه پروتون برای فراهم نمودن شرایط با بیشترین بهره در واکنش همجوشی p-^{6}Li ، مقدار ۴MeV می باشد. مقدار ضریب تکثیر انرژی علاوه بر انرژی اولیه باریکه پروتون ، تابعی از دمای الکترون و یون می باشد. این ضریب همچنین به چگالی یونها نیز بستگی دارد و تغییر در ترکیب یون حرارتی تنها اثر کمی بر آن دارد.

کلیدواژه‌ها: توکامک ، باریکه پروتون ، پلاسما p-^{6}Li ، ضریب تکثیر انرژی

Optimal injection energy of proton beam for the p-6Li fusion reaction in the tokamak reactor

Javad bahmani

Department of Physics, University of payam noor, P.O.BOX 19395-4697, Tehran, Iran

Abstract:

At present, tokamak 's researches are aimed to provide plasma conditions that can achieve significant thermonuclear power with high energy efficiency. In a tokamak reactor with neutral beam injection heating, it is important to determine the optimal energy to have a high energy multiplication factor. The results show that in such a reactor, the optimal energy of the proton beam to provide the conditions with the highest gain is 4MeV in the p-^{6}Li fusion reaction. The amount of energy multiplication coefficient, in addition to the initial energy of the proton beam, is a function of the temperature of the electron and ion. This coefficient also depends on the density of ions and the change in thermal ion composition has only a small effect on it.

Keywords: Tokamak, proton beam, p-^{6}Li plasma, energy multiplication factor

[1] Email:j.bahmanix22@ pnu. ac.ir

۱. مقدمه

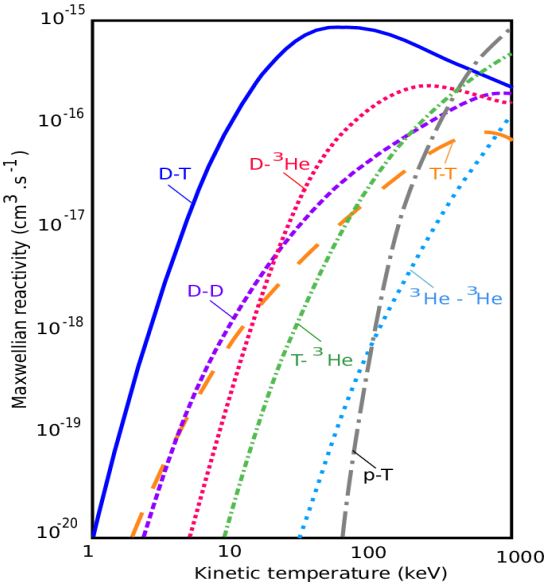
جهت استفاده از انرژی همجوشی آزاد شده در پلاسما باید آن را تا دمای بالا گرم و محصور کرد. توکامک‌ها دستگاههایی به شکل چنبره هستند که در آنها پلاسما به وسیله میدانهای مغناطیسی محصور شده‌اند. توکامک‌ها نوید بخش‌ترین روش برای تولید انرژی از همجوشی هسته ای می‌باشند. برای آنکه همجوشی هسته‌ای در پلاسما رخ دهد لازم است پلاسما تا دمای به اندازه کافی بالا، درحدود صد میلیون درجه سانتیگراد گرم شود. برای انجام این کار نیاز به دستگاههایی است که درآنها پلاسما در ناحیه محدودی از فضا بدون هیچ مرز فیزیکی محدود و نگهداری شود. یکی از مهمترین روشهای گرمایش ثانویه در توکامک، تزریق باریکه خنثی با انرژی بالا در پلاسما است. به محض باردار شدن ذرات باردار باریکه خنثی ، یونهای سریع در اثر برخوردهای کولنی کند می‌شوند. با کند شدن آنها ، انرژی به ذرات پلاسما منتقل می‌شود و به این ترتیب الکترونها و یونها گرم خواهند شد. در تزریق با سرعت بالا ، ابتدا الکترون گرم می‌شود. سپس با کند شدن یونهای باریکه گرما به یونهای هدف منتقل می‌شوند. یک راکتور توکامک با تزریق باریکه دارای سه ناحیه اساسی عملکرد شامل گرما هسته‌ای باریکه محور، چنبره دو مؤلفه‌ای و چنبره یونی می‌باشد[۴-۱].

در ناحیه دو مؤلفه‌ای انرژی راکتور توکامک(TCT[1]) به خاطر اینکه باریکه ذرات به انرژی زیادی نیاز دارد ، بنابراین نسبت توان همجوشی به توان تزریق تقریباً کوچک است [۵]. هنگامی که پارامتر محصورسازی افزایش می‌یابد ، عملکرد راکتور از ناحیه دومؤلفه‌ای به ناحیه باریکه محور و به تدریج به ناحیه گرماهسته‌ای احتراق شده تبدیل می شود. برای افزایش ضریب تکثیر انرژی توکامک باید باریکه پروتون با انرژی بهینه در پلاسمای لیتیوم تزریق کرد تا بتواند با وجود اتلافهای تابشی پایا باقی بماند. هدف از این مقاله محاسبه انرژی بهینه باریکه پروتون برای انجام واکنش همجوشی $p\text{-}^{6}Li$ در این نمونه راکتور می‌باشد.امروزه بیشترین مطالعات راکتور همجوشی در مورد سوخت D-T انجام شده است. این واکنش دارای بیشترین سطح مقطع همجوشی در پایین‌ترین انرژی در بین دیگر سوختهای همجوشی می باشد .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 نوترونهایی با انرژی۱۴MeV 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 مانند$D\text{-}^{3}He$، $p\text{-}^{6}Li$،$^{3}He\text{-}^{3}He$ و $p\text{-}^{11}B$ به منظور تولید خیلی کمتر نوترون و تابش رادیواکتیو نسبت به سوخت D-T بسیار مورد توجه قرار گرفته است .یکی از مهمترین مزیت واکنش $p + {}^{6}\mathrm{Li} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \alpha + 4.02\mathrm{MeV}$ این است که همه انرژی آزاد شده توسط ذرات باردار تولید می شود و لذا همه انرژی می تواند مستقیماً به توان الکتریکی در یک بهره بالا تبدیل شود.

۲. واکنش پذیری همجوشی $p\text{-}^{6}Li$

به طور کلی بهره سوخت همجوشی بوسیله کمیت واکنش پذیری (احتمال واکنش بر واحد زمان و چگالی هسته هدف) مشخص می‌شود و مقدار متوسط آن به صورت $<\sigma\nu>$ نمایش داده می شود (σ سطح مقطع و ν سرعت نسبی بین دو هسته) . شکل ۱ واکنش پذیری واکنش $p\text{-}^{6}Li$ و سایر سوختهای همجوشی برای مقایسه نشان می‌دهد.

[1] Two-energy-component tokamak



شکل ۱. متوسط واکنش پذیری همجوشی بر حسب دمای یون برای واکنشهای همجوشی مختلف[۶]

۳. ضریب تکثیر انرژی

در راکتور TCT باریکه پروتون در پلاسمای نسبتاً خالص لیتیوم تزریق می‌شود. در زمان کندشدگی یونهای پرانرژی پروتون ، واکنش باریکه – هدف بین ذرات پروتون و یونهای حرارتی اتفاق می‌افتد. برای ارزیابی عملکرد واکنش باریکه – هدف ($p \rightarrow {}^6Li$) ، ضریب تکثیر انرژی به صورت نسبت توان همجوشی تولید شده از طریق برهم کنش باریکه-هدف به توان باریکه پروتون تزریق شده تعریف می‌شود :

$$\chi_{p^6Li} = \frac{n_{^6Li} Q_{p^6Li}}{E_p} \int_{E_p}^{E_{th}} \frac{\langle \sigma v \rangle_{p^6Li}}{\left|\frac{dE}{dt}\right|} dE \qquad (۱)$$

که $Q_{p^6Li} = 4.02MeV$ انرژی آزاد شده در هر واکنش همجوشی p-^{6}Li ، $n_{^6Li}$ چگالی لیتیوم، E_{th} انرژی حرارتی باریکه پروتون و $\langle \sigma v \rangle_{p^6Li}$ متوسط واکنش‌پذیری همجوشی بین باریکه فرودی پروتون با لیتیوم ، E_p انرژی اولیه پروتون ، $\left|\frac{dE}{dt}\right|$ نرخ انتقال انرژی باریکه پروتون در در اثر برخورد کولنی با یونهای حرارتی لیتیوم در مدت زمان کندشدن می باشد که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است[۷]:

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{p+^6Li} = -\frac{4\pi e^4 \ln\Lambda_{p+^6Li}}{V}\left[\frac{n_{^6Li}}{m_{^6Li}} + \frac{4}{3\sqrt{\pi}}\frac{n_e}{m_e}\left(\frac{m_e E}{m_p T_e}\right)^{3/2}\right]$$

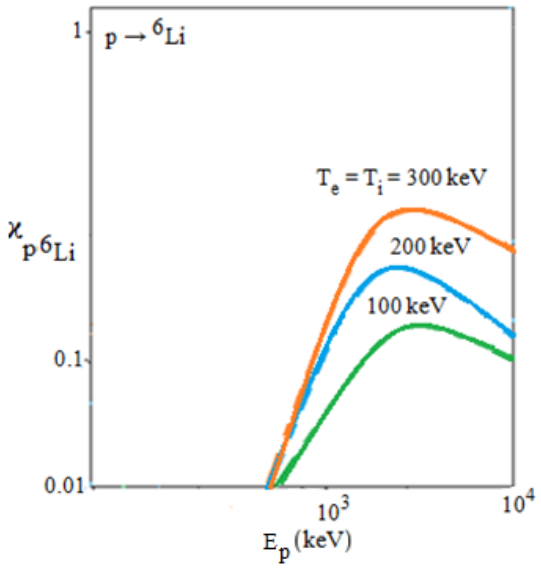
(۲)

که m_e ، $m_{^6Li}$ جرم الکترون و لیتیوم می‌باشد و v سرعت یونهای پرانرژی می باشد. $\ln\Lambda_{p+^6Li}$ لگاریتم کولنی می باشد که در اینجا مقدار ۲۵ فرض می شود.

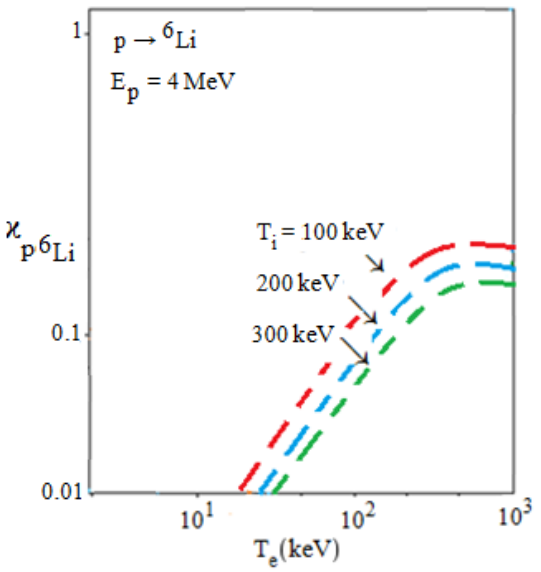
۴. انرژی بهینه تزریق باریکه پروتون

بررسی ها نشان می‌دهد که χ_{p^6Li} به دمای الکترون و انرژی باریکه پروتون بستگی دارد . شکل ۲ تغییرات ضریب تکثیر انرژی بر حسب انرژی تزریق باریکه پروتون در دماهای مختلف با فرض خالص بودن پلاسمای لیتیوم نشان می-دهد. بهینه انرژی تزریق باریکه ذرات پروتون برای واکنش باریکه هدف ، انرژی است که راکتور دارای ماکزیمم ضریب

تکثیر انرژی باشد. طبق این شکل با فرض $T_e=T_i$ بیشترین χ_{p^6Li} در انرژی ۴ MeV رخ می دهد. به عبارت دیگر انرژی بهینه باریکه پروتون برای انجام واکنش همجوشی $p\text{-}^6Li$ در راکتور TCT برابر ۴MeV است . شکل ۳ تغییرات ضریب تکثیر انرژی در انرژی بهینه ۴MeV بر حسب تابعی از دمای الکترون در دماهای مختلف یون نشان می‌دهد. یونهای تزریق شده با برخورد یونهای لیتیوم خالص کند می شوند این ضریب با افزایش دمای الکترون در مقدار ثابت E_p افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که مقدار χ_{p^6Li} برای $E_p\rangle 4MeV$ با افزایش E_p کاهش می یابد. همچنین بررسی-ها نشان می‌دهد که مقدار χ_{p^6Li} به دلیل فرآیند کندشدگی در پلاسما همجوشی $p\text{-}^6Li$ به چگالی یونها نیز بستگی دارد و تغییر در ترکیب یون حرارتی تنها اثر کمی بر مقدار χ_{p^6Li} دارد.

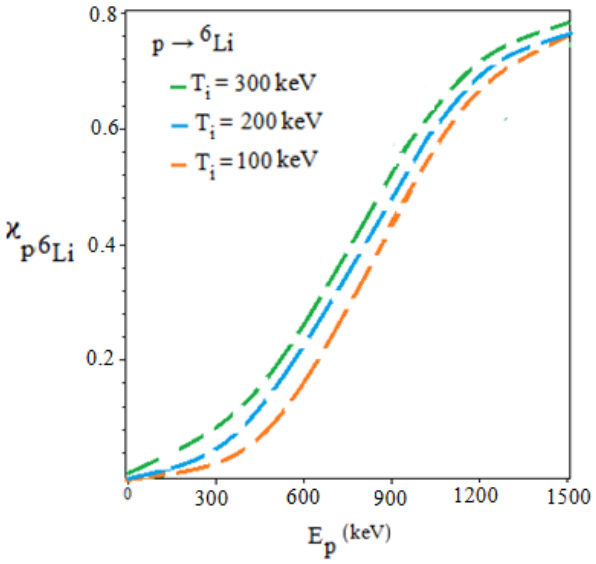


شکل۲: ضریب تکثیر انرژی بر حسب انرژی تزریق باریکه پروتون



شکل۳ : ضریب تکثیر انرژی بر حسب دمای الکترون در انرژی تزریق بهینه باریکه پروتون

شکل ۴ تغییرات χ_{p^6Li} بر حسب انرژی پروتون در دماهای یون مختلف نشان می دهد . به دلیل کاهش دراگ یون ، مقدار χ_{p^6Li} با افزایش دمای یون به کندی افزایش می‌یابد که این نتیجه مطلوب است. با افزایش دمای یون ، واکنش پذیری برای انرژی‌های کمتر به دلیل اثر دوپلر افزایش می‌یابد و این عامل باعث افزایش ضریب تکثیر انرژی می‌شود.



شکل۴ : ضریب تکثیر انرژی بر حسب انرژی پروتون در دماهای مختلف یون

۵. نتیجه‌گیری

هدف از تحقیقات همجوشی ، ساخت یک راکتور قدرت با بهره بالا و استفاده مطلوب از انرژی حاصل در جهت مقاصد کاربردی می‌باشد. رسیدن به دمای احتراق یک سوخت هسته‌ای با صرف کمترین انرژی برای افزایش بهره راکتور همجوشی از اهمیت به سزایی برخوردار است. مزیت واکنش همجوشی بدون نوترون $p\text{-}^{6}Li$ این است که همه انرژی آزاد شده توسط ذرات باردار می‌تواند مستقیماً به توان الکتریکی با بهره بالا تبدیل شود. پروتون های تزریق شده در لیتیوم با دمای پایین انرژی خود را از طریق برخوردهای کولنی با الکترونها و یونها از دست می دهد. پروتونها در هنگام حرارتی شده $\chi_{p^{6}Li}$ برابر انرژی تزریق شده در واکنش همجوشی انرژی تولید می‌کنند. برای $\chi_{p^{6}Li}$ قابل ملاحظه دمای الکترون باید در مرتبه الکترون ولت باشد. برای رسیدن به $\chi_{p^{6}Li}\rangle 1$ به دمای الکترون بالا نیاز است. $\chi_{p^{6}Li}$ به کندی با دمای یون افزایش می یابد. نتایج محاسبات عددی با استفاده از معادلات بالا و همچنین ترسیم نمودارها با نرم افزار میپل نشان می‌دهد در یک راکتور توکامک با گرمایش تزریق باریکه خنثی، مناسب ترین انرژی تزریق باریکه پروتون در هدف لیتیوم خالص برای انجام واکنش همجوشی مقدار ۴MeV می‌باشد. مقدار ضریب تکثیر انرژی علاوه بر انرژی اولیه باریکه پروتون ، تابعی از دمای الکترون و یون‌ها می‌باشد و به چگالی یونها نیز بستگی دارد و تغییر در ترکیب یون حرارتی تنها اثر کمی بر آن دارد. عوامل دیگر مانند زمان کندشدگی یونهای سریع ، پراکندگی انرژی ، ناخالصی ها ، کلمپینگ و مبادله بار و اتلاف الکترونهای گیراندازی شده در تعیین مقدار $\chi_{p^{6}Li}$ اثرگذارند که بدلیل طولانی متن مقاله از بیان این عوامل تأثیرگذار صرفنظر شده است.

۶. مراجع

1. Song, Y. T., Wu, S. T., Li, J. G., Wan, B. N., Wan, Y. X., Fu, P., ... & Chen, Y. (2014). Concept design of CFETR tokamak machine. IEEE Transactions on Plasma Science, 42(3), 503-509

2. Sykes, A., Costley, A. E., Windsor, C. G., Asunta, O., Brittles, G., Buxton, P., ... & Smith, G. (2017). Compact fusion energy based on the spherical tokamak. *Nuclear Fusion*, *58*(1), 016039.

3. Rozenkevich, M., Perevezentsev, A., Subbotin, M., Candido, L., Testoni, R., & Zucchetti, M. (2020). Optimisation of fuel cycle for IGNITOR tokamak at TRINITI in Russia: A critical review. *international journal of hydrogen energy*, *45*(56), 32311-32319

4. Hemsworth, R. S., Boilson, D., Blatchford, P., Dalla Palma, M., Chitarin, G., De Esch, H. P. L., ... & Zaccaria, P. (2017). Overview of the design of the ITER heating neutral beam injectors. *New Journal of Physics*, *19*(2), 025005

5. Stix, T. H. (1975). Fast-wave heating of a two-component plasma. *Nuclear Fusion*, *15*(5), 737.

6. Momota, H., Tomita, Y., & Nomura, Y. (1980). *An optimization of fusion plasma parameters* (No. IPPJ--460). Nagoya Univ.(Japan). Inst. of Plasma Physics.

7. Silvukhin D.,” in Reviews of Plasma Physics”; (Consultants Bureau, New York, (1966) 93.