سوخت‌های سنگین برای گداخت هسته‌ای

شروین گودرزی*[۱]،رضا امراللهی[۲] ، امیر رئیس دانا[۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۸۸/۸/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله:
۸۸/۱۱/۲۸

چکیده:

در سه دهه اخیر مخلوطD-T با توجه به خواص مناسب آن به عنوان سوخت نیروگاه‌های گداخت آینده بیشترفعالیت‌ها و امکانات پژوهشی را به خود اختصاص داده است، اما واکنش-D Tمشکلاتی نیز دارد که مهم‌ترین آن‌ها تولید مقدار قابل ملاحظه‌ای نوترون است که بخش عمده‌ای از انرژی تولید شده را به خود اختصاص می‌دهند که عملا هدر می‌رود و در ضمن سبب تخریب شدید مواد ساختار رآکتور و خطرات قابل توجه بیولوژیکی و زیست محیطی می شوند. برای حل این مشکلات، مطالعاتی برای یافتن سوخت‌هایی که بتوانند جایگزین چرخه سوختD-T شوند انجام شده است. در این مقاله انواع سوخت‌های قابل استفاده در گداخت هسته‌ای معرفی شده‌اند و خواص آن‌ها و امکان استفاده از این سوخت‌ها در آینده مورد بررسی قرار گرفته است. حصول به شرایط لازم برای وقوع گداخت خودنگهدار با این سوخت‌ها هنوز نیاز به پیشرفت‌های علمی و فنی بسیاری دارد ولی غیر عملی نیست. از نتایج مطالعات انجام شده مخلوط هیدروژن ـ بور۱۱، مناسب ترین سوخت برای رفع مشکلات ذکر شده شناخته شده است و عمده تحقیقات در این باره بر آن متمرکز شده اند.

کلمات کلیدی:
گداخت هسته ای، سوخت های پیشرفته، نوترون

۱) استادیار، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران. (نویسندهٔ مسئول)
۲) استاد، دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۳) کارشناس ارشد، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌آی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.

مقدمه

سوخت‌هاي اصلي گـداخت هـسته‌اي شـامل ايزوتـوپ هـاي هيـدروژن و سـاير اتـم هـاي سـبك ماننـدهليم، ليتـيم و بـور اسـت. امـروزه، تحقيقـات گـداخت عمـدتاً بـرروي گـداخت D-T در توكامـك هـا متمركزشـده اسـت [۱۳- ۲] اين واكـنش بـدين خـاطر انتخـاب شـده اسـت كـه در مقايـسه بـا هـر واكـنش ديگرگـداخت بـالاترين سـطح مقطـع را داراسـت و بـراي احتـراق بـه كمتـرين شـرايط محـصورسازي ($n\tau_E T = 4.9\times10^{21} keV.s/m^3$) وكمتـرين دمـا (در حـدود ۱۰۰ميليـون درجـه كلـوين) نيـاز دارد [۱۶و۱۵ و۱۳ و ۵]. امـا، تـريتيم راديـو اكتيـو اسـت و در طبيعـت يافـت نمـي‌شـود و بايـد بـه طـور مـصنوعي از طريـق واكـنش $n(Li,T)\alpha$ ، در يـك پوشـش زاينـده تهيـه شـود. ايـن توليد تريتيم در محل مي‌توانـد منجـر بـه انباشـت مقـادير قابـل توجـه تـريتيم شـود كـه مـشكلات مربـوط بـه ايمنـي و تكثيـر سـوخت را افـزايش مـي دهـد [۱۵و۱۳]. گـداخت D-T دو ايـراد عمـده دارد: يكـي ايـن كـه منبـع بـالقوه‌اي بـراي سـلاح‌هـاي هـسته‌اي بـه شـمار مـي رود و ديگـر ايـن كـه نـوترون هـاي سـريع توليـد شـده در آن بـه سـاختار رآكتـور (بـه ويـژه ديـواره اوليـه آن) لطمـه مـي زننـد و عمـر مفيـد آن هـا را كـاهش مـي‌دهنـد و همچنـين آن را راديواكتيو مي‌كنند و بـدين ترتيـب احتمـال مـي‌رود كـه ايـن رآكتورهـا مقـادير زيـادي پـسمان‌هـاي راديـو اكتيـو توليـد كنند [۱۶ و ۱۵ و۱۳و ۵].

سوخت‌های جدید و خواص آنها

مشکلات مربوط به پسمان گداخت را می‌توان با انتخاب یک سوخت بهتر کاهش داد. کاندیداهای مختلفی برای سوخت‌های گداخت وجود دارند که سوخت‌های پیشرفته نامیده می شوند و تعداد نوترون‌های تولید شده در آن ها نسبت به گداخت D-T بسیار کمتر است و بنا براین مشکلات مربوط به رادیواکتیویته و ایمنی وزیست محیطی ندارند. به طور کلی، گداخت غیر نوترونی به هر شکلی از گداخت اطلاق می‌شود که در آن کمتر از یک در صد از انرژی آزاد شده توسط نوترون‌ها حمل شود، ولی شرایط لازم برای کنترل گداخت غیر نوترونی بسیار دشوارتر از شرایط لازم برای چرخه سوخت متداول دوتریم ـ تریتیم است و هنوز به طور تجربی حاصل نشده است [۲۰]، حتی اگرروزی معلوم شود که گداخت غیر نوترونی از نظر علمی عملی است، این سئوال باقی می‌ماند که آیا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود؟

دلایل اصلی اهمیت مطالعه برای یافتن چرخه های سوخت پیشرفته عبارتند از [۱۵و ۱۳]:

۱- حذف تریتیم از چرخه سوخت به منظور ساده‌سازی چرخه سوخت (عدم نیاز به زایش تریتیم) و افزایش ذخیره سوخت گداخت ذخیره لیتیم زمین مقدار کل تریتیمی را که قابل تولید با پوشش‌های زاینده هست محدود می‌کند.

۲- حذف (و یا کاهش فوق العاده) تولید نوترون در رآکتورهای گداخت به منظور اجتناب از(یا تا حد ممکن کاهش دادن) فعال‌سازی اجزای راکتورها و تخریب ناشی از نوترون‌ها.

بعضی از این چرخه ها عمدتاً ذرات باردار تولید می‌کنند که این امکان را فراهم می‌سازد که انرژی خروجی را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل کنند [۱۸ و ۶ و ۵] که این امتیاز بسیار مهمی است. زیرا، در نیروگاه‌های برق معمول حدود ۸۰ درصد هزینه به تجهیزات تبدیل حرارتی مربوط می شود. [۲۰ و ۱۸ و ۴].

دوچرخه مهم سوخت پیشرفته عبارتند از $D-^3He$ و $p-^{11}B$ ، چرخه سوخت $D-^3He$ ، تعداد خیلی کمتری نوترون نسبت به چرخه سوخت D-T تولید می کند و انرژی این نوترون ها نیز خیلی کمتر است، بنابراین، میزان تخریب مواد کاهش خواهد یافت، مطالعات نشان داده‌اند که چرخه سوخت $D-^3He$ به میزان قابل توجهی مسأله طول عمر اجزای راکتور را با کاهش تخریب نوترونی حل می‌کند در حالی که مشکل فعال سازی نوترونی و تولید پسمانهای مربوط به آن کماکان باقی می‌ماند. در این چرخه، تریتیم حذف شده است ولی ایزوتوپ نایاب هلیم ۳ جایگزین آن شده است. بر روی زمین در حدود ۴۰۰ کیلوگرم هلیم۳ قابل حصول است که در حدود ۸ GW-year انرژی گداخت به دست می‌دهد و مقادیر بیشتر از این باید یا از طریق واکنش-هایی که شامل نوترونند تهیه شود (که مزیت بالقوه گداخت غیر نوترونی را از بین می‌برد) و یا اینکه از منابع ماورای زمین تهیه شود. بر روی سطح ماه در حدود 10^9 کیلوگرم هلیم ۳ وجود دارد که معادل هزار سال مصرف انرژی فعلی جهان است. همچنین، در اتمسفر سیارات عظیم گازی در حدود 10^{23}کیلوگرم هلیم ۳ وجود دارد که قادر است در حدود 10^{17}سال مصرف فعلی انرژی جهان را تولید کند، یعنی منابع هلیم ۳ منظومه شمسی عملا پایان ناپذیرند[۷]. ولی استخراج هلیم ۳ از این منابع و انتقال آن به زمین بسیار دشوار و پرهزینه خواهد بود[۱۱و۹و۸] و تنها در آینده های دور می توان به آن اندیشید.

چرخه سوخت $D-^3He$ نسبت به D-T برای احتراق، نیازمند شرایط محصورسازی بالاتری ($n\tau_E T = 2.4\times10^{23} keV.s/m^3$) است و در فشار پلاسمای یکسان چگالی توان گداخت کمتری نسبت به گداخت D-T به دست خواهد داد [۲۰و ۱۳]. همچنین گرچه واکنش اصلی $^3He(D,p)\alpha$ را می‌توان غیر نوترونی دانست ولی تولید نوترون از طریق واکنش جانبی $D(D,n)^3He$ و واکنش ثانویه D(T,n)α اجتناب ناپذیر است.

واکنش گداخت $p-^{11}B$ ایمن‌ترین و بهترین واکنش هسته‌ای هست که وجود دارد، ^{11}B به فراوانی در آب دریا و منابع دیگر یافت میشودو ۸۰ درصد بور موجود بر روی زمین را شامل می‌شود و هیدروژن هم که فراوان ترین عنصر در عالم هستی است، بنابراین، مشکلی از نظر محدودیت منابع سوخت وجود ندارد. حاصل واکنش آن ها نیز گاز بی اثر هلیم است و هیچ نوترونی تولید نخواهد شد [۱۶و ۱۵ و ۱۴ و ۱۳]. در این فرایند از واکنش یک هسته ^{11}B و یک پروتون،یک اتم

کربن ۱۲ در حالت برانگیخته تولید می‌شود. این اتم کربن برانگیخته به ^{8}Be و ^{4}He تجزیه می شود و ^{8}Be نیز، با سرعت بسیار زیادی (در 10^{-13} ثانیه) به دو اتم هلیم ۴ دیگر تجزیه می‌گردد. در این فرایند نه سوخت تابش زاست و نه محصول واکنش و هیچ نوترونی تولید نمی شود [۱۹و۱۶].

برای بهره برداری عملی از گداخت، انرژی حاصل از گداخت باید بیش از انرژی لازم برای گرمایش پلاسما باشد، بدین منظورشروط متعددی باید برآورده شوند که مهمترین آنها، دست‌یابی به مقادیر مناسب برای حاصل ضرب $n\tau$ و حاصل ضرب $nT\tau$ است که مجموع این ها معیار لاوسون نامیده می‌شود. یعنی باید پلاسما را با چگالی مناسب تا دمای مناسبی گرم کرد و این پلاسمای داغ و چگال را به مدت کافی محصور نمود[۲و ۱]. به عنوان مثال، این شرط برای واکنش دوتریم- تریتیم به قرار زیر است:

$$T > 10keV$$
$$n\tau > 10^{20} m^{-3} s \qquad (۱)$$

مقدار عدد به دست آمده در معیار لاوسون برای سوخت دوتریم ـ تریتیم ازسال ۱۹۶۹ تا سال ۲۰۰۰ حدود ۵۰۰ هزار برابر افزایش یافته است. سوخت‌های جدید مورد نظرهنوز نیاز به یک تا دو مرتبه افزایش در بزرگی دارند. بررسی‌های نظری نشان داده‌اند که این کار شدنی است[۷].

واکنش های گداخت به سه نسل تقسیم می‌شوند [۱۴و ۷ و ۵ و۲]:

$$D + T \rightarrow n(14.07MeV) + {}^{4}He(3.52MeV)$$
$$D + D \rightarrow n(2.45MeV) + {}^{3}He(0.82MeV) \qquad (۲)$$
$$D + D \rightarrow p(3.02MeV) + T(1.01MeV)$$

احتمال وقوع واکنش های دومی و سومی یکسان است

نسل دوم:

$$D + {}^{3}He \rightarrow p(14.68\,MeV) + {}^{4}He(3.67\,MeV) \qquad (۳)$$

نسل سوم:

$${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow 2p + {}^{4}He(12.86MeV)$$
$$p + {}^{11}B \rightarrow 3{}^{4}He(8.68MeV) \qquad (۴)$$

سوخت‌های پیشرفته، گداخت سوخت‌های نسل دوم و سومند که مقادیر بسیار کم یا اصلا هیچ نوترونی تابش نمی‌کنند وچرخه های سوخت نسل اول در آنها وجود ندارد.تعداد نوترون های تولید شده در واکنشهای شامل هلیم۳ بسیار کم است(در مورد واکنش $^3He-^3He$ عملا صفر و در مورد $D-^3He$ حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ گداخت D-T و کمتر از ۰/۰۲ گداخت D-D است) [۱]. محصول نسل سوم واکنش‌های گداخت فقط ذرات باردار است و هر گونه واکنش جانبی نسبتاً بی اهمیت است. در شرایط مناسب فقط ۰/۱درصد از انرژی حاصل از واکنش $p-^{11}B$ ، توسط نوترون‌های تولید شده از واکنش‌های جانبی حمل می‌شود [۱۱].

اما، استفاده از این سوخت های جدید نسبت به D-T با مشکلات بیشتری مواجه است، به عنوان مثال، در مورد $D-^3He$ باید ۱) دمای احتراق دست کم حدود ۶ برابر افزایش یابد ۲) مقدار $n_e\tau_e$ اقلا حدود ۸ برابر و حاصل ضرب $n\tau T$ حداقل در حدود ۵۰ برابر افزایش یابد[۶].

در استفاده از سوخت $D-^3He$ کاهش فوق العاده شار نوترونی باعث کاهش قابل ملاحظه تخریب تابشی می شود ودرنتیجه طول عمر دیواره اولیه و حفاظ تابشی افزایش می یابد و به حفاظ تابشی کوچک‌تری نیاز خواهد بود و تعمیرات و نگهداری راحت تر می شوند. افزایش شار ذرات باردار امکان تبدیل مستقیم انرژی گداخت را با بازده بالا(۶۰ تا ۸۰ درصد) فراهم می سازد[۶ و۵].

مشکلات عمده در استفاده از انرژی هسته ای در سالیان گذشته از سه مسأله اصلی ناشی می شد: احتمال پخش مواد رادیو اکتیو، مشکلات مربوط به نگهداری پسمان های هسته‌ای با عمر طولانی، احتمال استفاده از مواد حاصل برای کاربردهای تسلیحاتی[۴]، تمام این مشکلات مربوط به رآکتورهای هسته ای مربوط است به[۴]: ۱- سوخت رادیواکتیو ۲- محصولات رادیواکتیو واکنش ۳- نوترون ها. گداخت هسته‌ای تاحدودی از این مشکلات می کاهد[۱۹]:

۱- مشکلات مربوط به ذوب قلب و گریز به خارج ذرات رادیواکتیو حل می‌شود ولی چندین گیگا کوری مواد رادیواکتیو در رآکتور وجود دارد که در صورت وقوع حادثه‌ای می‌تواند به خارج پخش شود.

۲- انتخاب مناسب سوخت و مواد ساختاری می‌تواند نیمه عمر موثر را به کمتر از صد سال کاهش دهد ولی تخریب‌های تابشی و جایگزینی اجزا می توانند مقادیر بزرگی پسمان هسته ای ایجاد کنند.

۳- این رآکتورها نیاز به مواد شکافا(fissile) یا زاینده (fertile) ندارند اما، نوترون‌های تولید شده می‌توانند برای تولید ^{239}Pu به کار روند.

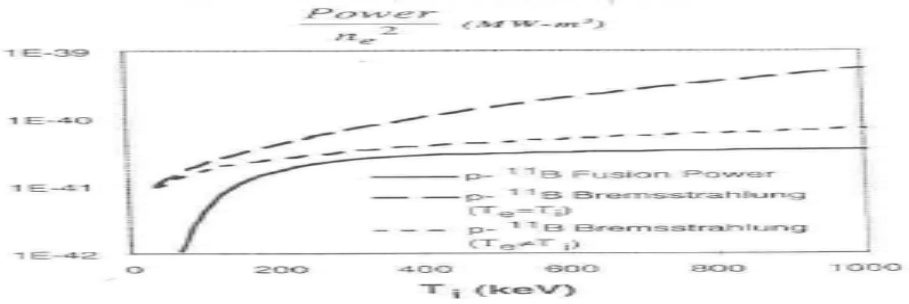
مزیت عمده سوخت‌های جدید گداخت این است که سوخت و محصولات واکنش های نسل دوم و سوم گداخت میزان پرتوزایی(تخریب حرارتی و وجود تریتیم) و نکات بالقوه مربوط به تکثیر تسلیحاتی وهمین طور مشکلات مربوط به پسماندای را تا حد زیادی کاهش داده یا حذف می‌کنند [۱۹]، ولی برای استفاده از آن‌ها به پیشرفت فیزیکی و مهندسی زیادی نیاز است . از این سوخت‌های جدید می‌توان برای ساخت نیروگاه‌های برق ایمن، تمیز و اقتصادی، در سفاین فضایی

و موشک‌ها به عنوان سوخت و نیز برای کاربردهای پزشکی و غیره استفاده کرد. از مزایای دیگر آن‌ها می‌توان از عدم نیاز به پوشش‌های زاینده تریتیم و حلقه های پیچیده سرمایش ثانویه و عدم نیاز به دستگاه‌های پیچیده تست نوترون و مدت زمان های بررسی طولانی نام برد [۱۹].

به دلایل ذکر شده، در حال حاضر، بیشتر مطالعات گداخت غیرنوترونی بر واکنش $p-^{11}B$ متمرکز شده است [۱۰و۱۱]. ولی، همان طور که از قبل گفته شد، گداخت هیدروژن ـ بور در مقایسه با دوتریم ـ تریتیم بسیار دشوارتر است. گداخت هیدروژن ـ بور به انرژی‌های یونی با دماهایی در حدود ده بار بیش از گداخت دوتریم ـ تریتیم نیاز دارد،علاوه بر آن حداکثر نرخ واکنش هیدروژن ـ بور (σv) فقط یک سوم نرخ واکنش دوتریم ـ تریتیم است، بنا براین، به شرایط محصورسازی بهتری برای انرژی پلاسما نیاز خواهد بود. $n\tau$ لازم برای هیدروژن ـ بور ۴۵ برابر مقدار مربوط به دوتریم ـ تریتیم است وحاصل ضرب $nT\tau$ لازم برای آن ۵۰۰ بار بیش از دوتریم ـ تریتیم است[۵].

پارامترهای متعددی در استفاده از سوخت‌های مختلف دخیلند، از جمله انرژی کل محصولات گداخت: E_{fus} ،انرژی محصولات باردار گداخت: E_{ch} ،عدد اتمی ذرات درگیر در واکنش: Z ، میزان انرژی حمل شده توسط نوترون ها، اتلاف انرژی از طریق تابش برمشترالونگ (ترمزی) و....[۱۳].

در رابطه با گداخت D-D و D-T اتلاف انرژی از طریق تابش ترمزی مشکل جدی و مهمی است که باید حل شود، برای سوخت‌های سنگین‌تر $D-^3He$ ، $p-^{11}B$ و $^3He-^3He$ ، میزان این اتلاف به قدری است که کار یک راکتور گداخت بر اساس طرح‌های توکامک و گداخت لیزری را ناممکن می‌سازد، در شکل زیر مقایسه‌ای میان توان ناشی از تابش ترمزی و توان حاصل از گداخت برای سوخت $p\text{-}^{11}B$ انجام شده است (مشخص شده که در واکنش $p\text{-}^{11}B$ انرژی تلف شده از طریق تابش ترمزی حداقل ۱/۷۴ برابر انرژی حاصل از گداخت است). برای حل این مشکل راه هایی بررسی و رد شده اند [۱۲- ۱۰و۱].



شکل (۱): مقایسه توان گداخت (P_{fusion}) و توان برمشترالونگ برای واکنش $p\text{-}^{11}B$ [۱۰].

تابش سینکروترونی نیز نکته دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که درمورد گداخت D-T تابش سینکروترونی نقش چندانی در بالانس انرژی ندارد، در حالی که در مورد گداخت $D-^3He$ این اثر قابل توجه است[۱۲] واین مشکل باید در طراحی رآکتورهای احتمالی $D-^3He$ حل شود. درصدی از انرژی کل واکنش که توسط نوترون ها حمل می‌شود، در مورد D-T حدود ۸۰ درصد، در مورد D-D حدود ۶۶ درصد و در مورد $D-^3He$ و $p-^{11}B$ بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است که این امرمشکلات مختلف مربوط به نوترون ها از جمله تخریب تابشی، حفاظ‌گذاری بیولوژیکی، کنترل از دور، ایمنی و اتلاف توان گداخت توسط آنها را کاهش می دهد [۱۷و۴]. ولی مقداری فعال سازی براثر پرتوهای گامای پرانرژی تولید شده از طریق واکنش $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ و تولید نوترون از طریق واکنشهای $^{11}B(\alpha,n)^{14}N$ و $^{11}B(p,n)^{11}C$ رخ می‌دهد و ضریب ایمنی کاهش می یابد [۱۷]. اما، این نوترون ها فقط در حدود ۰/۲ درصد از انرژی کل واکنش را حمل می کنند [۱۸و۴].

چگالی ماکزیمم توان در فشار ثابت برای $p-^{11}B$ خیلی کمتر از D - T است. (در حدود ۲۱۰۰بار) و در مورد $D-^3He$ نیز بیش از ۱۰۰ بار این امر نشانه‌ای بر آن است که دست‌یابی به انرژی گداخت غیرنوترونی با روشهای محصور سازی موجود ممکن نخواهد بود [۲۰و۱۳].

برای دست‌یابی به گداخت هیدروژن ـ بور، تلاشهای گسترده ای با استفاده از دستگاه‌های مختلف انجام شده است، در این میان پلاسمای کانونی نسبت به سایر دستگاههای گداخت دستگاه بسیار جمع و جور و ارزانتر است. این دستگاه‌ها که در دهه ۱۹۶۰ به دو مدل مختلف در شوروی سابق و امریکا اختراع شده و به نام مخترعینشان به ترتیب نوع فیلیپوف و نوع مدر نامیده شده‌اند. به طور اساسی، سیستمهایی پالسی‌اند که از دو الکترود هم محور تشکیل می‌شوند که در پایین به وسیله یک قطعه عایق از هم جدا می‌شوند و فضای بین آنها با گازی با فشار کم (۱۰ -۱/ ۰ تور) پر شده است. الکترود داخلی نقش آند و الکترود خارجی نقش کاتد را بازی می کند [۱۸و۴و۳]. اساس کار این دستگاهها بر تولید پلاسما به وسیله تخلیه‌های الکتریکی با ولتاژ و جریان بالا بین این دو الکترود است [۱۸ و۱۰ و۴و۳]. نحوه عملکرد این دستگاهها به طور کامل در مراجع مختلف تشریح شده است[۱۲و ۱۱و۷و۱]. در ستون پینچ این دستگاهها نقاط بسیار کوچکی با ابعاد و عمر کم و چگالی و دمای زیاد مشاهده می شوند که نقاط داغ نام دارند [۱۸و۲]. معمولاً ، چگالی نقاط داغ در محدوده $۱۰^{۲۰}-۱۰^{۲۱}\ cm^{-3}$ است.

در سال ۲۰۰۱، اریک ج.لرنر و همکارانش از آزمایشگاه فیزیک پلاسمای لارنس ویل (IPP) دماهای یونی و الکترونی بیش از ۱۰۰ کیلوالکترون ولت را درنقاط داغ یک دستگاه پلاسمای کانونی در دانشگاه A&M تگزاس گزارش دادند[۲۰و۱۸ و۴]. برای مقایسه باید خاطرنشان کرد که بیشترین مقادیر T_i به دست آمده در رآکتور توکامک گداخت آزمایشی بین المللی ۴۴ کیلو الکترون ولت و در مورد T_e فقط ۱۱/۵ کیلوالکترون ولت است. بهترین نتایج، حاصل ضرب چگالی-زمان محصورسازی ـ انرژی در این آزمایش حدود $n\tau T_i = 5\times10^{15}\ keV.s/cm^3$ بود که رکوردی برای

تحقیقات گداخت جهان محسوب می شود و حدود ده برابر بیشتر از بهترین نتایج به دست آمده در آزمایشات انجام شده در توکامکهای بسیار بزرگ است [۱۳و۱۲]. این حاصلضرب سه تایی فاکتور خیلی مهمی است زیرا به طور مستقیم با کسر سوخت گداختی که مصرف میشود متناسب است [۱۳].

چنان دماهای یونی بالایی اخیرا در Z پینچ های Wire arrays از ساندیا نیز گزارش شده است، اگر این نتایج درست باشند به معنای مطرح شدن مجدد Z پینچ ها و پلاسمای کانونی به عنوان رآکتورهای گداخت هستند، در ضمن این دماهای بالا امکان وقوع واکنش گداخت $p-^{11}B$ را فراهم می کنند [۱۹و ۱۳و۱۲]. در سال ۲۰۰۵ نیز یک گروه روسی گداخت غیر نوترونی هیدروژن–بور را با استفاده از یک لیزر پیکوثانیه انجام دادند اما تعداد ذرات آلفای تولید شده در این آزمایش بسیار کم بود(در حدود 10^{3}به ازای یک پالس لیزر) [۹].

باید توجه کرد که چگالی های بسیار بالایی که در این آزمایش مشاهده شده در بسیاری از آزمایشات انجام شده در دستگاه های پلاسمای کانونی دیگر هم دیده شده است اما این آزمایشات اولین مواردی بودند که در آنها دماهایی بالایی مثل $T_e > 100$ keV همراه با چنان چگالیهای پلاسمای بالایی مشاهده شده است [۱۳و۱۲]. یک مانع خیلی مهم در برابرکسب انرژی خالص از این سوخت ها آن است که با بالا رفتن عدد اتمی Z میزان تابش برمشترالونگ به شدت افزایش می یابد و گرمایش پلاسما به وسیله ذرات آلفای تولید شده بر اثر گداخت را از بین می برد زیرا همه انرژی به صورت تابش ایکس از دست می رود.البته تحلیل هایی برای کاهش تابش برمشترالونگ ارائه شده اند [۱۲]. به هر حال از نتایج این آزمایشات به نظر می رسد که پلاسمای کانونی بالقوه یک دستگاه مناسب برای گداخت با سوخت های پیشرفته به شمار میرود.

تابش های باقی مانده از یک رآکتور $p-^{11}B$

محاسبات جامع نشان داده اند که در یک پلاسمای گرمایی $p-^{11}B$ حداقل ۰/۱درصد واکنشها نوترون تولید میکنند و انرژی این نوترون ها در حدود کمتر از۰/۲درصد کل انرژی آزاد شده است، این نوترون ها به طور اساسی از واکنش $^{11}B(\alpha,n)^{14}N$ تولید میشوند، یک منبع مهم دیگر نوترون ها واکنش $^{11}B(p,n)^{11}C$ است، ^{11}C نیز رادیو اکتیو است ولی از آنجا که نیمه عمر آن فقط ۲۰ دقیقه است تابش آن در چند ساعت به سطوح قابل صرف نظر افت می کند[۹].علاوه بر نوترون ها، مقادیر زیادی پرتو ایکس بر اثر تابش برمشترالونگ تولید می شوند و در اثر واکنش گداخت $B(p,\gamma)^{12}C$ (با احتمال منشعب شدن حدود 10^{-4} از واکنش گداخت اولیه) نیز پرتوهای گامای ۴ و۱۲و ۱۶ مگا الکترون ولتی تولید می گردند [۹]. برای جلوگیری از انجام واکنش های جانبی نوترون زایی مثل $^{11}B(D,n)^{12}C$ و $D(D,n)^{3}He$ باید سوخت خالص ایزوتوپی به کار رود واز جریان ناخالصی ها به داخل پلاسما جلوگیری شود . با طراحی مناسب می توان دز رسیده به اپراتورها دراثر تابش های نوترون و گاما را به حداقل رساند[۹].اجزای اصلی حفاظ

عبارتند از آب برای کند کردن نوترون های سریع، بور برای جذب نوترون های کندشده و فلز برای جذب پرتوهای ایکس، ضخامت کل لازم حفاظ در حدود یک متر است که بیشتر آن آب است.

چرخه های سوخت مختلف دیگری نیز مانند D-D کاتالیزه شده وجود دارند که در آن ^3He و تریتیم تولید شده نیز مجددا مصرف میشوند(از طریق واکنشهای D-T و $D-^3He$) ولی هیچ امتیازی بر گداخت D-T ندارد(هم تولید نوترون بیشتر و هم شرایط محصورسازی دشوارتر)[۱۰].

درگداخت کنترل شده با مخلوط هیدروژن و بور۱۱، تقریبا تمام انرژی واکنش به صورت ذرات باردار آزاد می شود و نوترونی تولید نمیگردد بنابراین رادیواکتیویته القایی حذف شده یا به حداقل می رسد[۱۳و۱۲] ، واکنش اصلی $p+^{11}B \rightarrow 3^4He(8.68MeV)$ تنها ذرات باردار تولید می کند، ولی ذرات آلفای تولید شده در واکنش اصلی با واکنش جانبی $^4He+^{11}B\rightarrow^{14}N+n$ موجب تولید تعدادی نوترون میشوند، ولی همان طوری که از قبل گفته شد این نوترون ها فقط در حدود ۰/۲ درصد از انرژی کل واکنش را حمل می کنند ، سوخت هیدروژن–بور همچنین تبدیل مستقیم انرژی ذرات به انرژی الکتریکی را بدون نیاز به تجهیزات گران قیمت واسطه ای مثل توربین بخار و ژنراتور میسر می سازد [۱۳و۱۲]. اما گداخت با چنان سوخت هایی به دماهای متوسط یونی و الکترونی ای بیش از ۱۰۰ کیلو الکترون ولت(حدود ۱/۱ میلیارد درجه کلوین) در یک پلاسمای چگال نیاز دارد.

نتیجه گیری

استفاده از سوخت های سنگین تری برای گداخت هسته ای مانند مخلوط دوتریم- هلیم۳ یا هیدروژن- بور۱۱ امکان غلبه بر عمده ترین نقایص واکنش گداخت دوتریم-تریتیم یعنی تولید مقدار قابل ملاحظه ای نوترون، ایجاد مقداری پسمان رادیواکتیو و خطر استفاده از مواد حاصل برای کاربرد های تسلیحاتی را فراهم میسازد. اما استفاده از این سوخت ها در رآکتورهای گداخت با مشکلات عمده ای همچون نیاز به دما ، چگالی و زمان نگهداری بالاتر واتلاف قابل توجه انرژی از طریق تابش برمشترالونگ روبروست که حل آن ها نیاز به پیشرفت های تکنولوژیکی و علمی قابل توجهی دارد. از مجموع مطالعات و آزمایش های انجام شده تاکنون معلوم شده که مخلوط هیدروژن - بور۱۱ مناسب ترین سوخت سنگین برای رآکتورهای گداخت در آینده خواهد بود که شرایط لازم برای گداخت خودنگهدار در آن در بعضی از دستگاه های پلاسمای کانونی و Z پینچ ها قابل حصول می باشد که بدین ترتیب احتمال استفاده از پلاسمای کانونی و Z پینچ به عنوان رآکتور گداخت مجددا مطرح شده است.

منابع

[۱] "گداخت هسته ای"، نوشته کاشیرو نیو، ترجمه رضا امراللهی و حبیب الله مینو، سازمان انرژی اتمی ایران، چاپ اول، بهار ۱۳۷۴.

[۲] "توکامک: تنها رهیافت گداخت گرماهسته ای"، نوشته جان وسون، ترجمه رضا امراللهی، سازمان انرژی اتمی ایران، پاییز ۱۳۷۵.

[3] http://www.focusfusion.org/lernertxtfigsJFE, 2005/06/16, Eric J.Lerner, " Towards Advanced-fuel Fusion:Electron,Ion Energy> 100 keV in a Dense Plasma".

[4] http://www.science.edu/TechoftheYear/TechoftheYear.htm.

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel.

[6] http://aries.ucsd.edu/snowmass/SG-A/Alt.-Fuels_2-pager.4-26.html.

[7] John F.Santarius, "*Role of Advanced-Fuel and Innovative Concept Fusion in the Nuclear Renaissance*", APS Division of Plasma Physics Meeting, Philadelphia, 31 October 2006.

[8] http://www.eastlundscience.com/FUSIONFUEL.html 3/13/2008.

[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Aneutronic_fusion 3/12/2008.

[10] W. M. Nevins, J. Fusion Energy, Vol. 17, No. 1, p.25-32(1998).

[11] J. F. Santarius et al, J. Fusion Energy, Vol. 17, No. 1, p.33-40(1998).

[12] Eric J. Lerner, "*Prospects For p-^{11}B Fusion With The Dense Plasma Focus: New Results*", Conf. Current Trends in International Fusion Research, Washington, USA (2003).

[13] http://focusfusion.org/log/index.php/site/article 14/7/2008.

[14] .L.Kulcinski and J.F.Santarius, "*New Opportunities for Fusion in the 21st Century – Advanced Fuels*", 14th Tropical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 15-19 october 2000, Park City UT.

[15] Robert W.Bussard, "*The Advent of Clean Nuclear Fusion: Superperformance Space Power and Propulsion*", 57th International Astronautical Congress(IAC), Valencia, Spain, Oct 2006. [۱۶] Leopoldo Soto, Plasma Phys. Control. Fusion, 47(2005) A361-A381.

[16] A. Bernard et al, Nucl. Instrum. Meth, 145, P.191-218 (1977).

[17] M. Sadowski , G. Tech. Phys.,39, Special Suppl , P.3-4(1998).

[18] S. Lee & A. Serban , IEEE Trans. Plasma Sci., Vol 24, No 3, P.1101-1105(1996).

[19] Leopoldo Soto, Plasma Phys. Control. Fusion, 47(2005) A361-A381.