

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 مخلوط D-T با توجه به خواص مناسب آن به عنوان سوخت نیروگاه‌های گداخت آینده بیشتر فعالیت‌ها و امکانات پژوهشی را به خود اختصاص داده است، اما واکنش D-T مشکلاتی نیز دارد که مهم‌ترین آن‌ها تولید مقدار قابل ملاحظه‌ای نوترون است که بخش عمده‌ای از انرژی تولید شده را به خود اختصاص می‌دهند که عملاً هدر می‌رود و در ضمن سبب تخریب شدید مواد ساختار راکتور و خطرات قابل توجه بیولوژیکی و زیست محیطی می‌شوند. برای حل این مشکلات، مطالعاتی برای یافتن سوخت‌هایی که بتوانند جایگزین چرخه سوخت D-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 - بور ۱۱، مناسب‌ترین سوخت برای رفع مشکلات ذکر شده شناخته شده است و عمده تحقیقات در این باره بر آن متمرکز شده اند.

کلمات کلیدی:

گداخت هسته‌ای، سوخت‌های پیشرفته، نوترون

(۱) استادیار، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران. (نویسنده مسئول)

(۲) استاد، دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) کارشناس ارشد، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.

مقدمه

[]

D-T

$$(n\tau_E T = 4.9 \times 10^{21} \text{ keV.s/m}^3)$$

[] ()

$$n(Li, T)\alpha$$

: D-T []

()

[]

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 می‌شوند و تعداد نوترون‌های تولید شده در آن‌ها 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 - تریتیم است و هنوز به طور تجربی حاصل نشده است [۲۰]، حتی اگر روزی معلوم شود که گداخت غیر نوترونی از نظر علمی عملی است، این سؤال باقی می‌ماند که آیا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود؟

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

- 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 راکتورهای گداخت به منظور اجتناب از (یا تا حد ممکن کاهش دادن) فعال‌سازی اجزای راکتورها و تخریب ناشی از نوترون‌ها.

بعضی از این چرخه‌ها 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 می‌شود. [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 می‌کند و انرژی این نوترون‌ها 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 فعال‌سازی نوترونی و تولید پسمانهای مربوط به آن کماکان باقی می‌ماند. در این چرخه، تریتم حذف شده است ولی ایزوتوپ نایاب هلیوم ۳ جایگزین آن شده است. بر روی زمین در حدود ۴۰۰ کیلوگرم هلیوم ۳ قابل حصول است که در حدود ۸ GW-year انرژی گداخت به دست می‌دهد و مقادیر بیشتر از این باید یا از طریق واکنش‌هایی 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 هلیوم ۳ وجود دارد که معادل هزار سال مصرف انرژی فعلی جهان است. همچنین، در اتمسفر سیارات عظیم گازی در حدود 10^{23} کیلوگرم هلیوم ۳ وجود دارد که قادر است در حدود 10^{17} سال مصرف فعلی انرژی جهان را تولید کند، یعنی منابع هلیوم ۳ منظومه شمسی عملاً پایان ناپذیرند [۷]. ولی استخراج هلیوم ۳ از این منابع و انتقال آن به زمین بسیار دشوار و پرهزینه خواهد بود [۱۱ و ۸ و ۹] و تنها در آینده‌های دور می‌توان به آن اندیشید.

چرخه سوخت $D-^3He$ نسبت به D-T برای احتراق، نیازمند شرایط محصورسازی بالاتری ($n \tau_E T = 2.4 \times 10^{23} \text{ keV.s/m}^3$) است و در فشار پلاسمای یکسان چگالی توان گداخت کمتری نسبت به گداخت D-T به دست خواهد داد [۲۰ و 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 $D(T, n)\alpha$ 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 می‌شود و ۸۰ درصد بور موجود بر روی زمین را شامل می‌شود و هیدروژن هم که فراوان‌ترین عنصر در عالم هستی است، بنابراین، مشکلی از نظر محدودیت منابع سوخت وجود ندارد. حاصل واکنش آن‌ها نیز گاز بی اثر هلیوم است و هیچ نوترونی تولید نخواهد شد [۱۶ و ۱۵ و ۱۴ و ۱۳]. در این فرایند از واکنش یک هسته ^{11}B و یک پروتون، یک اتم

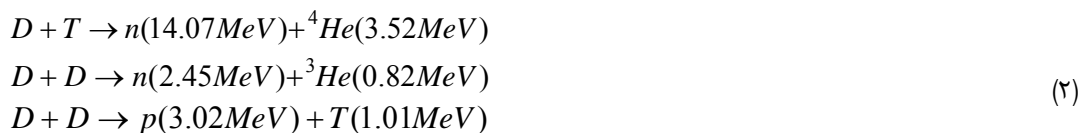
کربن ۱۲ در حالت برانگیخته تولید می‌شود. این اتم کربن برانگیخته به ${}^8\text{Be}$ و ${}^4\text{He}$ تجزیه می‌شود و ${}^8\text{Be}$ نیز، با سرعت بسیار زیادی (در 10^{-13} ثانیه) به دو اتم هلیوم ۴ دیگر تجزیه می‌گردد. در این فرایند نه سوخت تابش زاست و نه محصول واکنش و هیچ نوترونی تولید نمی‌شود [۱۶ و ۱۹].

برای بهره برداری عملی از گداخت، انرژی حاصل از گداخت باید بیش از انرژی لازم برای گرمایش پلاسما باشد، بدین منظور شروط متعددی باید برآورده شوند که مهمترین آنها، دستیابی به مقادیر مناسب برای حاصل ضرب $n\tau$ و حاصل ضرب $nT\tau$ است که مجموع این‌ها 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 [۱ و ۲]. به عنوان مثال، این شرط برای واکنش دوتریم-تریتیم به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} T &> 10\text{keV} \\ n\tau &> 10^{20} m^{-3}s \end{aligned} \quad (1)$$

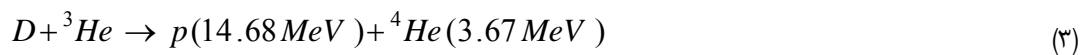
مقدار عدد به دست آمده در معیار لاوسون برای سوخت دوتریم - تریتیم از سال ۱۹۶۹ تا سال ۲۰۰۰ حدود ۵۰۰ هزار برابر افزایش یافته است. سوخت‌های جدید مورد نظر هنوز نیاز به یک تا دو مرتبه افزایش در بزرگی دارند. بررسی‌های نظری نشان داده‌اند که این کار شدنی است [۷].

واکنش‌های گداخت به سه نسل تقسیم می‌شوند [۱۴ و ۷ و ۵ و ۲]:



احتمال وقوع واکنش‌های دومی و سومی یکسان است

نسل دوم:



نسل سوم:



سوخت‌های پیشرفته، گداخت سوخت‌های نسل دوم و سومند که مقادیر بسیار کم یا اصلاً هیچ نوترونی تابش نمی‌کنند و چرخه‌های سوخت نسل اول در آنها وجود ندارد. تعداد نوترون‌های تولید شده در واکنش‌های شامل هلیوم ۳ بسیار کم است (در مورد واکنش ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ عملاً صفر و در مورد $D-{}^3\text{He}$ 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 بی‌اهمیت است. در شرایط مناسب فقط ۰/۱ درصد از انرژی حاصل از واکنش $p-{}^{11}\text{B}$ ، توسط نوترون‌های تولید شده از واکنش‌های جانبی حمل می‌شود [۱۱].

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

در استفاده از سوخت $D-{}^3\text{He}$ کاهش فوق‌العاده شار نوترونی باعث کاهش قابل ملاحظه تخریب تابشی می‌شود و در نتیجه طول عمر دیواره اولیه و حفاظ تابشی افزایش می‌یابد و به حفاظ تابشی کوچک‌تری نیاز خواهد بود و تعمیرات و نگهداری راحت‌تر می‌شوند. افزایش شار ذرات باردار امکان تبدیل مستقیم انرژی گداخت را با بازده بالا (۶۰ تا ۸۰ درصد) فراهم می‌سازد [۶ و ۵].

مشکلات عمده در استفاده از انرژی هسته‌ای در سالیان گذشته از سه مسأله اصلی ناشی می‌شد: احتمال پخش مواد رادیواکتیو، مشکلات مربوط به نگهداری پسمان‌های هسته‌ای با عمر طولانی، احتمال استفاده از مواد حاصل برای کاربردهای تسلیحاتی [۴]، تمام این مشکلات مربوط به رآکتورهای هسته‌ای مربوط است به [۴]: ۱- سوخت رادیواکتیو ۲- محصولات رادیواکتیو واکنش ۳- نوترون‌ها. گداخت هسته‌ای تا حدودی از این مشکلات می‌کاهد [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 می‌تواند مقادیر بزرگی پسمان هسته‌ای ایجاد کنند.

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

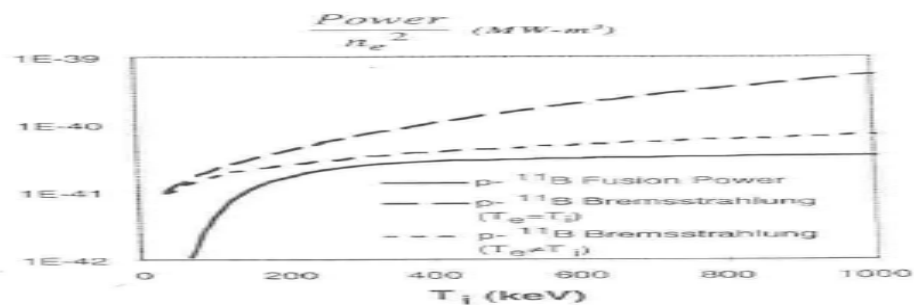
مزیت عمده سوخت‌های جدید گداخت این است که سوخت و محصولات واکنش‌های نسل دوم و سوم گداخت میزان پرتوزایی (تخریب حرارتی و وجود تریتم) و نکات بالقوه مربوط به تکثیر تسلیحاتی و همین‌طور مشکلات مربوط به پسمانداری را تا حد زیادی کاهش داده یا حذف می‌کنند [۱۹]، ولی برای استفاده از آنها به پیشرفت فیزیکی و مهندسی 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 تریتم و حلقه‌های پیچیده سرمایه‌ش ثانویه و عدم نیاز به دستگاه‌های پیچیده تست نوترون و مدت زمان‌های بررسی طولانی نام برد [۱۹].

به دلایل ذکر شده، در حال حاضر، بیشتر مطالعات گداخت غیرنوترونی بر واکنش $p-^{11}B$ متمرکز شده است [۱۱ و ۱۰]. ولی، همان‌طور که از قبل گفته شد، گداخت هیدروژن - بور در مقایسه با دوتریم - تریتم بسیار دشوارتر است. گداخت هیدروژن - بور به انرژی‌های یونی با دماهایی در حدود ده بار بیش از گداخت دوتریم - تریتم نیاز دارد، علاوه بر آن حداکثر نرخ واکنش هیدروژن - بور (σv) فقط یک سوم نرخ واکنش دوتریم - تریتم است، بنا براین، به شرایط محصورسازی بهتری برای انرژی پلاسما نیاز خواهد بود. $n\tau$ لازم برای هیدروژن - بور ۴۵ برابر مقدار مربوط به دوتریم - تریتم است و حاصل ضرب $nT\tau$ لازم برای آن ۵۰۰ بار بیش از دوتریم - تریتم 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 نوترون‌ها، 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 $p-^{11}B$ انجام شده است (مشخص شده که در واکنش $p-^{11}B$ انرژی تلف شده از طریق تابش ترمزی حداقل ۱/۷۴ برابر انرژی حاصل از گداخت است). برای حل این مشکل راه‌هایی بررسی و رد شده‌اند [۱۲ - ۱۰ و ۱۱].



شکل (۱): مقایسه توان گداخت (P_{fusion}) و توان برمشترالونگ برای واکنش $p-^{11}B$ [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] و این مشکل باید در طراحی رآکتورهای احتمالی $D-^3He$ حل شود. درصدی از انرژی کل واکنش که توسط نوترون‌ها 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 امر مشکلات مختلف مربوط به نوترون‌ها از جمله تخریب تابشی، حفاظ‌گذاری بیولوژیکی، کنترل از دور، ایمنی و اتلاف توان گداخت توسط آنها را کاهش می‌دهد [۱۷ و ۴]. ولی مقداری فعال‌سازی بر اثر پرتوهای گامای پرنرژی 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 می‌یابد [۱۷]. اما، این نوترون‌ها فقط در حدود ۰/۲ درصد از انرژی کل واکنش را حمل می‌کنند [۱۸ و ۴].

چگالی ماکزیمم توان در فشار ثابت برای $p-^{11}B$ خیلی کمتر از D-T است. (در حدود ۲۱۰۰ بار) 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 [۲۰ و ۱۳].

برای دستیابی به گداخت هیدروژن - 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 ارزاتر 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 الکتروود 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. الکتروود داخلی نقش آند و الکتروود خارجی نقش کاتد را بازی می‌کند [۱۸ و ۳]. اساس کار این دستگاهها بر تولید پلازما به وسیله تخلیه‌های الکتریکی با ولتاژ و جریان بالا بین این دو الکتروود است [۱۸ و ۱۰ و ۳]. نحوه عملکرد این دستگاهها به طور کامل در مراجع مختلف تشریح شده است [۱۲ و ۱۱ و ۷]. در ستون پینچ این دستگاهها نقاط بسیار کوچکی با ابعاد و عمر کم و چگالی و دمای زیاد مشاهده می‌شوند که نقاط داغ نام دارند [۱۸ و ۲]. معمولاً، چگالی نقاط داغ در محدوده $10^{21} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ است.

در سال ۲۰۰۱، اریک ج. لرنر و همکارانش از آزمایشگاه فیزیک پلاسمای لارنس ویل (IPP) دماهای یونی و الکترونی بیش از ۱۰۰ کیلو الکترون ولت را در نقاط داغ یک دستگاه پلاسمای کانونی در دانشگاه A&M تگزاس گزارش دادند [۲۰ و ۴]. برای مقایسه باید خاطر نشان 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 کیلو الکترون ولت است. بهترین نتایج، حاصل ضرب چگالی-زمان محصور سازی - انرژی در این آزمایش حدود $n\tau T_i = 5 \times 10^{15} \text{ keV.s/cm}^3$ 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 [۱۲ و ۱۳]. 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 اخیراً در Z پینچ های Wire arrays از سانديا 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 [۱۹ و ۱۳ و ۱۲]. 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 $T_e > 100 \text{ keV}$ همراه با چنان چگالیهای پلاسمای بالایی مشاهده شده است [۱۳ و ۱۲]. یک مانع خیلی مهم در برابر کسب 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 پلاسمای 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 ۰/۱ درصد واکنشها نوترون تولید میکنند و انرژی این نوترون ها در حدود کمتر از ۰/۲ درصد 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 $^{12}C(p, \gamma)$ (با احتمال منشعب شدن حدود 10^{-4} از واکنش گداخت اولیه) نیز پرتوهای گامای ۴ و ۱۲ و ۱۶ مگا الکترون ولتی تولید می گردند [۹]. برای جلوگیری از انجام واکنش های جانبی نوترون زایی مثل $^{12}C(D, n)^{11}B$ و $^3He(D, n)^3He$ باید سوخت خالص ایزوتوپی به کار رود و از جریان ناخالصی ها به داخل پلاسمای جلوگیری شود. با طراحی مناسب می توان دز رسیده به اپراتورها در اثر 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 کند شده 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 تریتم تولید شده نیز مجدداً مصرف میشوند (از طریق واکنشهای D-T و $D-^3\text{He}$) ولی هیچ امتیازی بر گداخت D-T ندارد (هم تولید نوترون بیشتر و هم شرایط محصورسازی دشوارتر) [۱۰].

در گداخت کنترل شده با مخلوط هیدروژن و بور ۱۱، تقریباً تمام انرژی واکنش به صورت ذرات باردار آزاد می شود و نوترونی تولید نمیگردد بنابراین رادیواکتیویته القایی حذف شده یا به حداقل می رسد [۱۳ و ۱۲]، واکنش اصلی $p + ^{11}\text{B} \rightarrow 3^4\text{He} (8.68\text{MeV})$ تنها ذرات باردار تولید می کند، ولی ذرات آلفای تولید شده در واکنش اصلی با واکنش جانبی $^4\text{He} + ^{11}\text{B} \rightarrow ^{14}\text{N} + n$ 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 [۱۳ و ۱۲]. اما گداخت با چنان سوخت هایی به دماهای متوسط یونی و الکترونی ای بیش از ۱۰۰ کیلو الکترون ولت (حدود ۱/۱ میلیارد درجه کلین) در یک پلاسمای چگال نیاز دارد.

نتیجه گیری

استفاده از سوخت های سنگین تری برای گداخت هسته ای مانند مخلوط دوتریم-هلیوم ۳ یا هیدروژن-بور ۱۱ امکان غلبه بر عمده ترین نقایص واکنش گداخت دوتریم-تریتم 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 و اتلاف قابل توجه انرژی از طریق تابش برمشترا لونگ 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 - بور ۱۱ 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 مجدداً 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 گرما هسته 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".](http://www.focusfusion.org/lernertxtfigsJFE, 2005/06/16, Eric J.Lerner,)
- [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-¹¹B 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.