پیشگفتار :

رشد سریع جمعیت در سده ی بیستم و تغییر در شیوه ی زندگی انسانها، روابط اقتصادی و بین المللی و موارد دیگر؛ حتی بهره وری از ساعات فراغت، هر کدام به گونه ای در افزایش اخیر مصرف سرانه که مکمل زندگی نوین و پیشرفته ی انسانهاست تاثیر گذاشته است و امروزه دنیا باید اندیشه ی کهن انرژی ارزان و ساده از نظر دستیابی را فراموش کرده و با علم به این که در آتی، انرژی حادترین مشکل انسانها خواهد بود، به دنبال جایگزین باشد. دانشمندان بر این باورند که اینگونه منابع انرژی جدید حتما به دست می آیند، اما مسلما برای دستیابی به این هدف، تکنولوژی بسیار پیچیده ای لازم خواهد بود و گروه بسیاری از دانشمندان و مهندسان باید پژوهش گسترده ای را انجام دهند. این کار، نیازمند هزینه ی سنگینی خواهد بود.

هم اکنون تکنولوژی همجوشی هسته ای کامل نیست، اما حل مشکلات نیز دشوار نمی باشد و مسلما دانشمندان و مهندسان به این هدف خواهند رسید. به همین دلیل است که بسیاری از آن ها، خود را برای پژوهش در این شاخه ی هسته ای وقف نموده اند.

در حال حاضر بشر راکتورهای شکافت را ساخته و در حال استفاده از آن می باشد و از دیگر منابع سوختی به خصوص سوختهای فسیلی نیز بهره می برد. اما این منابع هرگز منبع مطمئنی برای تامین انرژی نبوده و همیشه یک نگرانی از بابت مشکلات حاصل از استفاده و اتمام آنها وجود دارد و بشر به یک منبع تمام نشدنی و پاک برای تولید انرژی احتیاج دارد. به همین دلیل واکنشهای همجوشی هسته ای در طبیعت دیر زمانی است که متخصصان را در گیر خود ساخته که اگر استفاده از آن عملی و مقرون به صرفه شود برای قرنها انرژی بشر را تامین خواهد کرد . امروزه پیشرفت های زیادی در این علم در کشورهای پیشرفته ی دنیا از قبیل: امریکا، انگلیس، کانادا، ژاپن، فرانسه و ... صورت گرفته و امیدها را برای استفاده از آن بیش از پیش به واقعیت نزدیک کرده است.

یکی از روشهای همجوشی بر روی زمین همجوشی محصورسازی اینرسی[1] است که بشر برای به نتیجه رسیدن آن بسیار امیدوار است. در این روش کپسولهای سوختی تحت فشار لیزر و یا باریکه هایی از ذرات باردار به چگالی و دمای بسیار بالایی می رسد و این چگا لی و دمای بالا سبب نزدیکی زیاد هسته ها به هم گردیده به طوری که هسته ها بر سد کولنی[2] غلبه می کنند و نیروی جاذبه ی هسته ای بین آنها برقرار خواهد شد، همجوشی صورت خواهد گرفت و انرژی ای بیش از انرژی ورودی آزاد خواهد شد.

[1] Inertial confinement fusion
[2] Colon barier

همجوشی محصور سازی اینرسی بی شک به سمت ایجاد پلاسمای فوق چگال[۱] برای نزدیک کردن هسته ها پیش می رود. در نتیجه پیشرفت این روش، درگیر پیشرفت شناخت پلاسما و ویژگیهای آن می باشد و در واقع بررسی پلاسما، خود اساس بررسی های همجوشی گرما هسته ای خواهد شد.

در همجوشی محصور سازی اینرسی، روشی به نام اشتعال سریع[۲] وجود دارد که در آن پلاسما ی چگال را تشکیل داده و ذراتی مثل پروتون، انرژی اولیه ی لازم برای همجوشی، به آن می دهد. یکی از مشکلات به وجود آمده در مسیر باریکه برای انتقال انرژی به پلاسمای آماده برای همجوشی، ناپایداریهای[۳] است که همانند مقاومت در جریان الکتریکی از انتقال بهینه ی انرژی به آن منطقه جلوگیری می کنند.

در این پایان نامه در فصل اول اصول همجوشی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم روش اشتعال سریع را معرفی شده است. در فصل سوم ناپایداریهایی که در مسیر انتقال انرژی برای باریکه رخ می دهد و اصول بررسی حاکم بر آنها را مد نظر قرار می دهیم. در فصل چهارم که در واقع کار اصلی بیان شده در پایان نامه است با توجه به اصول گفته شده در فصول قبلی شرایطی را از نظر دمایی به دست خواهد آمد که کمترین اتلاف انرژی در مسیر راه انداز همجوشی هسته ای رخ دهد و در نتیجه بهره ی انرژی بالا رود.

[۱] Over dense-plasma
[۲] Fast ignition
[۳] Plasma – instability

فصل اول

مروری بر همجوشی هسته ای

در سال های اخیر تولید انرژی مانند آنچه که در خورشید اتفاق می افتد آرزوی بشر بوده است. می دانیم که منبع انرژی خورشید مانند دیگر ستارگان فرایندی است که همجوشی هسته ای[1] نامیده می شود. امروزه بسیاری از کشور های جهان مطالعات همجوشی هسته ای را مورد حمایت مشترک قرار می دهند و آن را به عنوان منبع جدیدی برای تولید الکتریسیته تلقی می کنند. این گونه تحقیقات امروزه اهمیت روز افزونی پیدا کرده، زیرا بحران انرژی تبدیل به یکی از نگرانی های مهم دنیا شده است. یکی از راه حل های این مسئله می تواند همجوشی باشد، به خصوص که نسبت به سوخت های فسیلی و حتی نیروگاه های هسته ای[2] می توان آن را بسیار ایمن تر و از نظر زیست محیطی بسیار تمیز تر دانست. با وجود اینکه تحقیقات زیادی راجع به همجوشی هسته ای صورت گرفته است، هنوز هیچ گونه راکتور همجوشی[3] کاربردی ساخته نشده است. در قدم اول با توجه به این که یکی از مکانهای مهمی که همجوشی هسته ای در آن انجام می گیرد خورشید است، این منبع انرژی می تواند به عنوان مهمترین مورد برای مطالعات انجام همجوشی هسته ای مورد استفاده قرار گیرد.

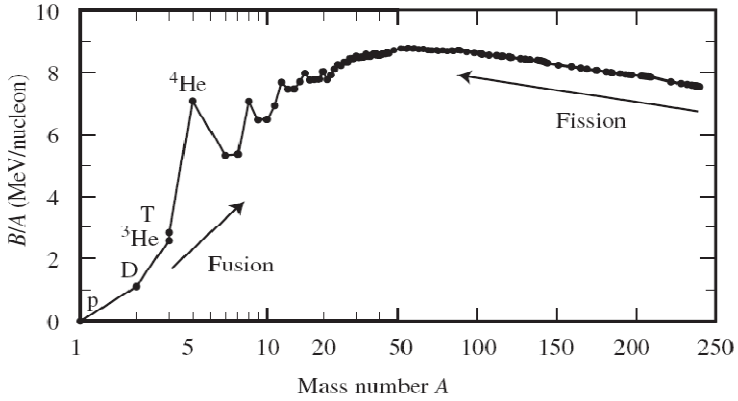
۱-۱- شرایط همجوشی بر روی خورشید و زمین :

برای پاسخ به این سوال باید به فیزیک هسته ای مقدماتی برگردیم. کلید انجام واکنش همجوشی هسته ای و انرژی آزاد شده از آن، انرژی بستگی هسته است. شکل(۱-۱) انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون را بر حسب عدد جرمی نشان می دهد. این نمودار در ناحیه نزدیک هسته آهن بیشترین مقدار خود را دارد، که پایدار ترین هسته در طبیعت می باشد. برای هسته هایی بسیار سنگین تر یا سبک تر از آهن، انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون کوچکتر می شود. این پدیده اختلاف بین فرایند شکافت و همجوشی است. اصول همجوشی هسته ای این است که اگر دو هسته خیلی سبک با هم همجوشی کنند، هسته ای با انرژی بستگی بیشتر (یا جرم کمتر) ایجاد می کنند، بنابراین این اختلاف جرم باعث رها شدن انرژی خواهد شد. همچنین وقتی یک هسته سنگین به دو پاره سبک تر تقسیم می شود انرژی آزاد می شود که به این پدیده، شکافت[4] می گویند. منحنی مربوط به این دو پدیده در مورد هسته ی عناصر در شکل (۱-۱) آورده شده است.

مسئله احتراق واکنش های همجوشی همیشه وجود دارد، زیرا هسته های سبک بار مثبت دارند و به شدت یکدیگر را دفع می کنند، تا اندازه ای که در شرایط عادی فاصله آنها آنقدر زیاد است که عملا هیچ گونه همجوشی اتفاق نمی افتد. پس چگونه چنین انرژی قدرتمندی در خورشید آزاد می شود؟ به علت دمای بالای $۱۰^{۸} K$ و فشار بالا در مرکز خورشید، تعداد زیاد ذرات و گستره زمانی در دسترس نسبتا زیاد، سطح مقطع[5] انجام چنین واکنشی آنقدر زیاد است که انرژی عظیمی در خورشید

[1] Nuclear fusion
[2] Nuclear power plant
[3] Fusion power plant
[4] Fission
[5] Cross section

تولید شود. در خورشید انرژی عموما طبق چرخه واکنش های p-p بدست می آید. این واکنش ها و انرژی آزاد شده از آن ها در جدول (۱-۱) آورده شده است.



شکل (۱-۱) : انرژی بستگی متوسط هسته های عناصر بر حسب عدد اتمی آنها [۱].

جدول (۱-۱) : واکنش همجوشی در خورشید و برخی دیگر از واکنشهای همجوشی مهم در طبیعت [۲].

	Q (MeV)	$\langle Q_\nu \rangle$ (MeV)
Main controlled fusion fuels		
$D + T \rightarrow \alpha + n$	17.59	
$D + D \rightarrow \begin{cases} T + p \\ {}^3He + n \\ \alpha + \gamma \end{cases}$	4.04 3.27 23.85	
$T + T \rightarrow \alpha + 2n$	11.33	
Advanced fusion fuels		
$D + {}^3He \rightarrow \alpha + p$	18.35	
$p + {}^6Li \rightarrow \alpha + {}^3He$	4.02	
$p + {}^7Li \rightarrow 2\alpha$	17.35	
$p + {}^{11}B \rightarrow 3\alpha$	8.68	
The p p cycle		
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	1.44	0.27
$D + p \rightarrow {}^3He + \gamma$	5.49	
${}^3He + {}^3He \rightarrow \alpha + 2p$	12.86	
CNO cycle		
$p + {}^{12}C \rightarrow {}^{13}N + \gamma$	1.94	
$[{}^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu + \gamma]$	2.22	0.71
$p + {}^{13}C \rightarrow {}^{14}N + \gamma$	7.55	
$p + {}^{14}N \rightarrow {}^{15}O + \gamma$	7.29	
$[{}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu + \gamma]$	2.76	1.00
$p + {}^{15}N \rightarrow {}^{12}C + \alpha$	4.97	
Carbon burn		
${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow \begin{cases} {}^{23}Na + p \\ {}^{20}Ne + \alpha \\ {}^{24}Mg + \gamma \end{cases}$	2.24 4.62 13.93	

همان طور که در جدول (۱-۱) مشاهده می شود پنج دسته واکنش همجوشی در آن وجود دارد که به ترتیب عبارتند از :

۱) سوختهای همجوشی کنترل شده ی اصلی : که مربوط به واکنش هیدروژن و ایزوتوپهای آن می باشد. این سوختها به دلیل سد کولنی پایین و سطح مقطع واکنش بالا اولین و مهمترین انتخاب برای واکنشهای همجوشی هسته ای می باشند .

۲) سوختهای همجوشی گسترش یافته : این سوختها ترکیبی از عناصر سبکتر غیر هیدروژن و هیدروژن و ایزوتوپهای آن می باشد.

۳) چرخه ی $p-p$: این واکنش از واکنشهای اساسی در فیزیک نجوم است و روش تولید انرژی در خورشید می باشد.

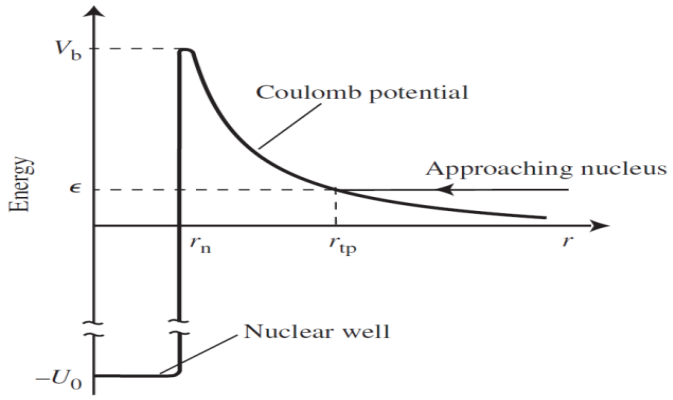
۴) چرخه ی CNO : این چرخه مربوط به واکنشهای همجوشی هیدروژن و دیگر عناصر تولید شده در ستارگان است. که در دماهای بزرگتر از $۱.۵\,KeV$ سرعت آن از سرعت چرخه ی $p-p$ پیشی می گیرد.

۵) واکنشهای $C-C$: این واکنشی است که در بین هسته های کربن اتفاق می افتد و بیشتر در ستارهای مزدوج (کوتوله سفید)[1] رخ می دهد. برای انجام چنین واکنشی چگالی های بزرگتر از $۱۰^{۹}\frac{gr}{cm^{۳}}$ باید وجود داشته باشد.

در روی زمین، فضا و زمان کافی مانند خورشید برای تولید انرژی در دسترس نیست. برای انجام واکنش همجوشی باید هسته ها را کاملا به هم نزدیک کنیم تا در محدوده جاذبه هسته ای[2] $m^{-۱۵}۱۰$ قرار گیرند. شکل (۱-۲) نمودار انرژی پتانسیل دو هسته را بر حسب تغییرات فاصله نشان می دهد. اما وقتی ذرات خیلی از هم دورند یکدیگر را دفع می کنند و دافعه الکترواستاتیکی آنها با کاهش فاصله افزایش می یابد. وقتی ذرات به حد کافی به هم نزدیک شدند، نیروی جاذبه هسته ای بین آنها برقرار می شود و همجوشی هسته ای رخ می دهد. با دادن انرژی جنبشی بالا به ذرات، می توان آنها را وادار به همجوشی کرد، که این کار با دادن گرمای زیاد و بالا بردن دما امکان پذیر است. این فرایند را همجوشی گرما هسته ای[3] می نامند. به دلیل گرما وچگالی بسیار زیاد لازم برای انجام واکنش همجوشی، سوخت باید در حالت پلاسما باشد که گازی داغ با رسانندگی الکتریکی و یونش بالا است. اگر دما به حد کافی زیاد شود سرعت گرمایی هسته ها افزایش می یابد و ذرات به انرژی جنبشی لازم برای غلبه بر سد کولنی می رسند. تحت چنین شرایطی ذرات به سرعت به اطراف پرتاب می شوند مگر اینکه به روشی تحت فشار قرار گیرند. در خورشید، این کار با نیروی گرانشی انجام می گیرد اما در زمین چنین گرانشی نداریم، بنابراین

[1] White dwarf
[2] Nuclear attraction
[3] Thermonuclear fusion

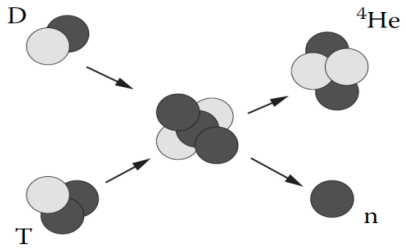
باید به روشی این محصورسازی[1] را انجام دهیم تا دما، فشار و چگالی را در مدت زمان کافی بالا نگه داریم[۱]. با توجه به مطالب بالا می توان انتظار داشت که در آینده نزدیک بتوان انرژی همجوشی را از واکنشهای نوع اول و دوم بر روی زمین انجام داد. وضعیت پتانسیل کولنی را برای دو ذره ی باردار در زیر ارائه شده است.



شکل (۱-۲) : نمودار پتانسیل کولنی برای دو ذره ی باردار برحسب تغییر فاصله [۲].

۱-۲- انتخاب سوخت مناسب برای راکتورهای همجوشی هسته ای :

همان طور که گفته شد به نظر می رسد آسان ترین واکنش همجوشی قابل حصول مربوط به ایزوتوپ های هیدروژن یعنی دوتریم[2] و تریتیم[3] باشد شکل (۱-۳)، زیرا بیشترین سطح مقطع وکمترین انرژی آستانه[4] را برای انجام واکنش گرما هسته ای دارا است. وقتی این دو هسته فرایند همجوشی هسته ای را انجام می دهند، هسته مرکبی شامل دو پروتون و سه نوترون ایجاد می شود. این هسته ها طبق واکنش (۱-۱) فورا به یک نوترون و یک ذره α شکافته می شود:

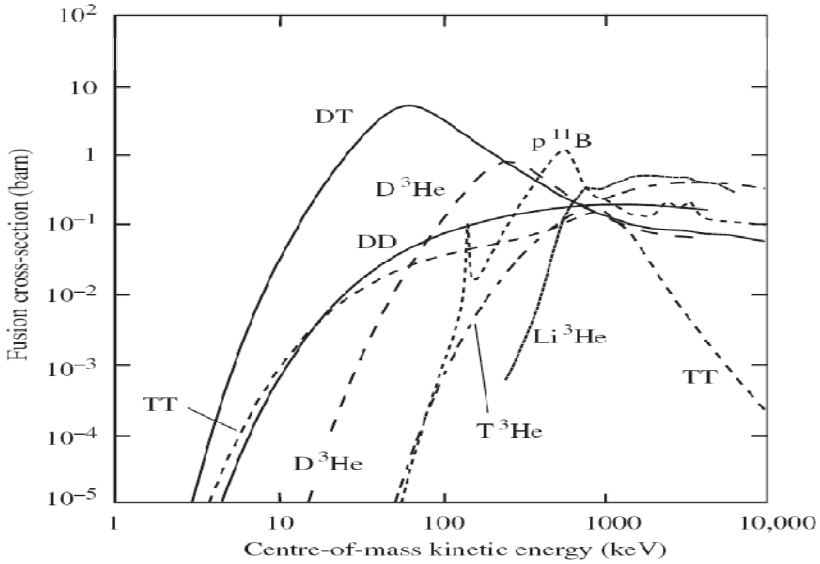


شکل (۱- ۳) : واکنش همجوشی DT [۱].

[1] Confinement
[2] Deuterium
[3] Tritium
[4] Threshold energy

$$D + T \rightarrow \alpha + n + 17.59\,MeV \qquad (۱-۱)$$

مقایسه ی سطح مقطع های دیگر واکنشهای همجوشی هسته ای با واکنش DT در شکل (۱-۴) ارائه شده است :



شکل (۱-۴) : سطح مقطع واکنش های همجوشی به ازای انرژی های مرکز جرم ذرات شرکت کننده در واکنش [۲].

دوتریم را می توان از آب دریا تهیه کرد و تریتیم را نیز می توان مستقیما درون یک راکتور شکافت هسته ای با واکنش لیتیوم و نوترون طبق واکنشی که در زیر آمده است، تولید کرد :

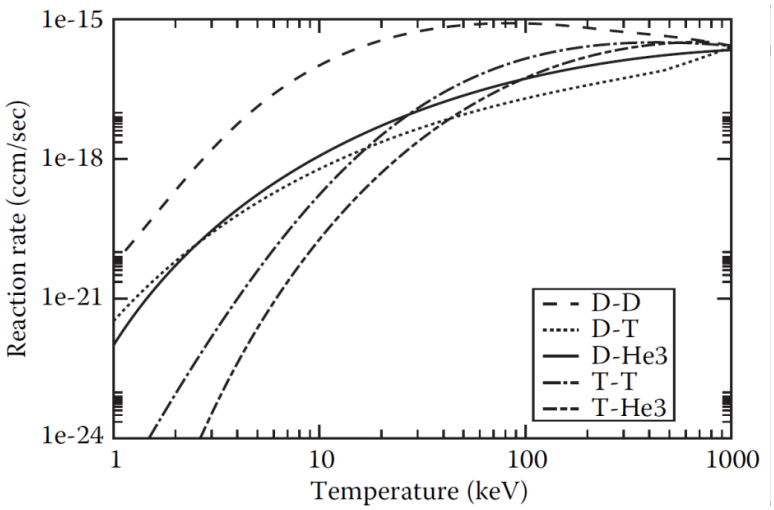
$$n + {}^{6}Li \rightarrow {}^{4}He + T + 25.1\,MeV \qquad (۲-۱)$$

لیتیوم عنصر فراوانی است و منابع آن تا $۱۰^{۴}$ سال کافی است. در استفاده از این واکنش به عنوان منبع سوخت همجوشی، دو مشکل وجود دارد: یکی اینکه تریتیم یک گاز رادیو اکتیو است و دیگر اینکه لیتیوم یک ماده سمی است. این یعنی برای داشتن راکتوری کاملا تمیز هنوز باید طراحی جدیدی را ارائه کنیم. مثلا می توانیم از دیگر واکنش های همجوشی که در آنها تریتیم و لیتیوم وجود ندارد، استفاده شود. البته این مسئله، هنوز در مقایسه با راکتورهای شکافت بسیار کمتر است زیرا نیمه عمر تریتیم ۱۲/۳ سال است اما نیمه عمر پاره های شکافت مانند ^{236}U، ^{238}Pu و ^{240}Pu بسیار زیاد تر می باشد [۱].

در واکنش DT، اگر فرض کنیم مقدار دوتریم و تریتیم برابر باشد (۵۰٪-۵۰٪)، آهنگ انجام فرایند همجوشی، W در پلاسمای چگال و داغ را با رابطه زیر نشان می دهند [۸]:

$$W = \frac{n^2}{4}\langle v\,\sigma \rangle \qquad (۳-۱)$$

که در آن v سرعت نسبی دو هسته و σ سطح مقطع واکنش است. ذرات موجود در پلاسما توزیع سرعت ماکسول – بولتزمن[1] دارند و انرژی جنبشی آنها $E_k = \frac{3k_B T}{2}$ است. سطح مقطع همجوشی σ شدیدا به سرعت نسبی هسته همجوشی کننده وابسته است و با میانگین گیری $\langle v\sigma \rangle$ روی تمام سرعت های نسبی ممکن بدست می آید. شکل (۱-۴) آهنگ انجام واکنش ها را برای واکنش های مختلف بر حسب دما نشان می دهد.



شکل (۱-۵) : آهنگ انجام واکنش بر حسب دما برای واکنشهای همجوشی هسته ای با توزیع ماکسولی ذرات [۱].

همان طور که دیده می شود، دما برحسب واحد انرژی $K_B T$ است. شکل (۱-۵) نشان می دهد که واکنش DT در تمام دماها آهنگ بالایی دارد و بیشترین انرژی را حاصل می کند.

اکنون که فهمیدیم کدام واکنش همجوشی را می توانیم انجام دهیم، حال باید ببینیم چگونه می توان محصورسازی را در زمان و فضای بسیار کمتری انجام داد. برای دسترسی به انرژی حاصل از همجوشی باید تعداد زیادی از آنها همزمان باهم اتفاق بیافتند، این یعنی ذرات را باید در مدت زمان معینی آنقدر کنار هم و محصور نگه داریم تا واکنش های همجوشی کافی اتفاق بیافتد. چون محصور سازی در چنین دما و چگالی بالایی بسیار مشکل است، مسئله ما پیدا کردن موقعیت هایی است که در آن محصورسازی تا حد امکان کمتر لازم باشد.

با توجه به مطالب فوق و شناخت سوخت مورد نظر برای همجوشی هسته ای بر روی زمین می توان از روی طراحی های اولیه در مورد راکتورهای همجوشی هسته ای، معایب و مزایای این راکتورها را نسبت به راکتورهای شکافت که در حال

[1] Maxwell-Boltzman distribution

استفاده در دنیا می باشند بررسی کرد. ما ابتدا به ویژگیهای راکتورهای همجوشی می پردازیم و سپس شرایط مورد نیاز برای محصورسازی و انجام همجوشی را بررسی می کنیم.

۱-۳- مزیت راکتورهای همجوشی بر راکتورهای شکافت :

راکتورهای همجوشی هسته ای دارای چندین مزیت نسبت به راکتورهای شکافت هسته ای هستند که مهمترین آنها عبارتند از [۸]:

۱) در راکتورهای همجوشی برخلاف راکتورهای شکافت، از هسته های سبک که فراوان بوده و به آسانی قابل حصول می باشند، استفاده می شود.

۲) محصولات نهایی همجوشی، معمولا هسته های سبک پایدارند و نه هسته های سنگین پرتوزا. بنابراین در راکتورهای همجوشی،بعد از توقف واکنشهای همجوشی، مشکلات پسماندی کمتری نسبت به راکتورهای شکافت وجود دارد.

۳) مقدار انرژی آزاد شده از واحد جرم سوخت در راکتورهای همجوشی نسبت به راکتورهای شکافت بسیار بیشتر است.

۴) بر خلاف راکتورهای شکافت، راکتورهای همجوشی دارای ایمنی ذاتی در مقابل انفجارات هسته ای هستند. علت این است که شرایط مورد نیاز برای تولید انرژی در یک راکتور همجوشی، بستگی به تعادل حساس میان پارامترهای معینی دارد که اگر این تعادل به هم بخورد، واکنش به طور خودکار قطع می شود.

۵) بازده ی کار راکتورهای همجوشی در مقایسه با راکتورهای شکافت بسیار بیشتر است. تحقیقات نشان داده است که برای مثال، یک راکتور آینه ای[1]، که یک راکتور همجوشی از نوع مغناطیسی است، حتی در شکل خیلی ابتدایی اش، دارای بازده یی در حدود۵۰ درصد می باشد، در حالی که بازده بهترین راکتورهای شکافت هسته ای، در حال حاضر ۴۲ درصد است.

مزایای گفته شده طوری است که باعث می شود بشر میل و رغبت بیشتری به تولید انرژی از طریق همجوشی داشته باشد و بیشتر تلاشها در جهت رسیدن به این امر جهت یابد. اما قبل از پرداختن به روشهای همجوشی به بررسی موردی می پردازیم که در سیستمهای تولید انرژی باید وجود داشته باشد تا این سیستم مقرون به صرفه باشد.

۱-۴- معیار لاوسون :

در یک پلاسمای محصور چقدر انرژی تولید می شود؟ انرژی تولید شده به ازای زمان τ به انرژی جنبشی Q واکنش و آهنگ همجوشی W بستگی دارد. این بستگی به صورت زیر می باشد:

$$E = W\,\tau\,Q = \frac{n^2}{4}\langle v\sigma\rangle\,\tau\,Q \qquad (۴-۱)$$

[1]. Mirror Reactor

که Q در آن بر حسب MeV است.

انرژی بدست آمده از فرایند همجوشی باید بزرگتر از انرژی لازم برای گرم کردن پلاسما باشد. به عبارت دیگر بهره انرژی[1] از سوخت DT وقتی مثبت است که انرژی آزاد شده از آن بزرگتر از مجموع انرژی جنبشی تمام ذرات باشد. انرژی جنبشی هسته ها و الکترون ها $E_{kin}=3nK_BT$ است. بنابراین فقط اگر رابطه زیر برقرار باشد انرژی آزاد شده از همجوشی بیشتر از مقدار لازم برای تولید پلاسما با چنین دما و چگالی خواهد بود [۱]:

$$3nK_BT < \frac{n^2}{4}\langle v\sigma\rangle \tau Q \qquad (۵-۱)$$

رابطه ۱-۵ را می توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$n\tau > \frac{12K_BT}{\langle v\sigma\rangle Q} \qquad (۶-۱)$$

به رابطه (۱-۶) معیار لاوسون[2] می گویند که یکی از شرایط اساسی محصورسازی لختی است. علاوه بر مسئله محصور سازی، ذرات همجوشی کننده نیز باید انرژی کافی داشته باشند تا بتوانند تعداد واکنش های بیشتری انجام دهند. برای سوخت همجوشی DTاین انرژی در دمایی در حدود $۵\,KeV$ بدست می آید. با توجه به اینکه انرژی آزاد شده از واکنش همجوشی در مورد DTبرابر با $۱۷/۶\,MeV$ و گستره دمایی راکتور هم $۱۰-۵\,KeV$ است، معیار لاوسون به صورت زیر نوشته می شود:

$$n\tau \approx 10^{14}-10^{15} \quad s\,cm^{-3} \qquad (۷-۱)$$

که در آن n تعداد ذرات برحسبcm^{-3} و τ زمان محصورسازی است.

۱-۵- روشهای محصور سازی پلاسما برای انجام همجوشی :

برای ایجاد شرایط همجوشی، پلاسما باید در زمان معینی محصور بماند. اساسا دو روش برای محصورسازی پلاسما وجود دارد:

۱) همجوشی محصورسازی مغناطیسی[3] (MCF)

۲) همجوشی محصورسازی اینرسی[4] (ICF)

[1] Energy gain
[2] Lawson criterion
[3] Magnetic Confinement Fusion
[4] Inertial Confinement Fusion

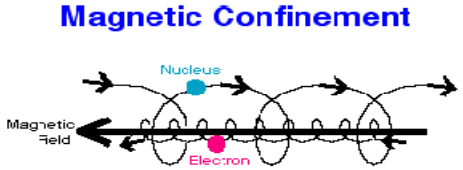
در روش MCF، برای برقراری معیار لاوسون باید پلاسما را در مدت زمان نسبتا طولانی در حد چند ثانیه در چگالی نسبتا کمی نگه داشت، در حالی که در روش ICF لازم است پلاسمای سوخت را در زمان بسیار کوتاهی در چگالی بالا نگه داشت. جدول (۱-۲) مقایسه ای از این دو روش را نشان می دهد:

جدول (۱-۲): مقایسه ی پارامترهای مهم محصورسازی در MCF و ICF.

پارامتر محصورسازی	MCF	ICF
چگالی ذره (n_e) cm^{-3}	10^{14}	10^{26}
زمان محصورسازی (τ) s	10	10^{-15}
معیار لاوسون $(n_e\,\tau)$ $s\,cm^{-3}$	10^{15}	10^{15}

۱-۵-۱- همجوشی محصور سازی مغناطیسی :

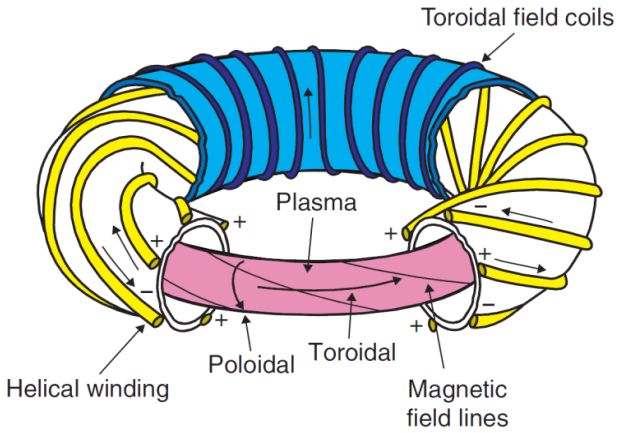
برای رسیدن به دما و چگالی مورد نیاز در پلاسما، نمی توان آن را در ظرفی محصور کرد زیرا پلاسما با ضربه زدن یون ها به دیواره ظرف خنک خواهد شد. همجوشی مغناطیسی به این دلیل این گونه نامگذاری شده است که با استفاده از میدان مغناطیسی مناسب، پلاسما را محصور می کند. این امر بدین دلیل میسر است که ذرات در پلاسمای داغ باردارند. وقتی ذرات باردار در یک میدان مغناطیسی یکنواخت[1] قرار می گیرند در راستای موازی خطوط میدان آزادانه حرکت می کنند ولی نیرویی در جهت عمود بر حرکت ذرات به آنها وارد می شود که باعث حرکت چرخشی آنها می شود. ترکیب این دو حرکت باعث حرکت مارپیچی ذرات می شود (شکل ۱-۶). در این روش تماس با دیواره ها عملا حذف می شود. چون ذرات باردار خطوط منحنی را دنبال می کنند، میدان مغناطیسی، ذرات را محصور می کند و آنها را وادار به حرکت در مدار های محدودی می کند که هیچگاه آنها را قطع نمی کنند.



شکل (۱-۶) : حرکت الکترونها و یونها در راستای میدان مغناطیسی [۱۵].

[1] Uniform magnetic field

برای ایجاد میدان مغناطیسی مناسب می توان از روش های مختلفی استفاده کرد. یکی از این روش ها استفاده از میدان مغناطیسی همگن استوانه ای با استفاده از جریان گذرنده از یک سیم پیچ[1] است. در این روش، هندسه میدانی ایجاد می شود که ذرات را بین دو انتها که میدان قوی تر است محصور می کند. نوع دیگر محصور سازی مغناطیسی، استفاده از یک میدان چنبره ای[2] است که ذرات در آن حول خطوط میدان حلقوی، حرکت مارپیچی انجام می دهند و هیچ گونه انتهایی وجود ندارد که نشت ذرات از آن صورت گیرد. یکی از دستگاه های مهمی که از این میدان چنبره ای استفاده می کند توکامک[3] است که در شکل (۱-۷) نمایی از این سیستم نشان داده شده است.



شکل (۱-۷): نمایی از سیستم محصور سازی توکامک [۱۵].

برای این که در روش همجوشی مغناطیسی، در سوخت احتراق صورت گیرد پلاسما باید بسیار داغ باشد. سه نوع مکانیسم گرمایش وجود دارد: گرمایش اهمی[4]، گرمایش به وسیله امواج فرکانس بالا[5] و تزریق باریکه ذرات خنثی[6]. در گرمایش اهمی، برخوردهای ذرات در پلاسما باعث ایجاد مقاومت در پلاسما می شود. گرمایش مطلوب وقتی بدست می آید که جریان از پلاسما عبور می کند. در گرمایش به وسیله امواج با فرکانس بالا، تابش امواج الکترومغناطیسی با فرکانس های خاص باعث ایجاد تشدید[7] می شود. ذرات، انرژی را از میدان موج به بیرون می برند که در نتیجه آن آهنگ برخورد ذرات، بسیار افزایش می یابد. در روش سوم از تزریق ذرات با انرژی چندین کیلو الکترون ولت استفاده می شود. وقتی ذرات وارد پلاسما می شوند

[1] Coil
[2] Toroidal field
[3] Tokamak
[4] Ohmic heating
[5] High-Frequency waves
[6] Injection of beams of neutral particle
[7] Resonance

به وسیله برخورد هایی که انجام می دهند یونیزه می گردند. در این حالت، ذرات در پلاسما به وسیله برهمکنش با پلاسما، انرژی خود را در مدت زمان کوتاهی افزایش می دهند.

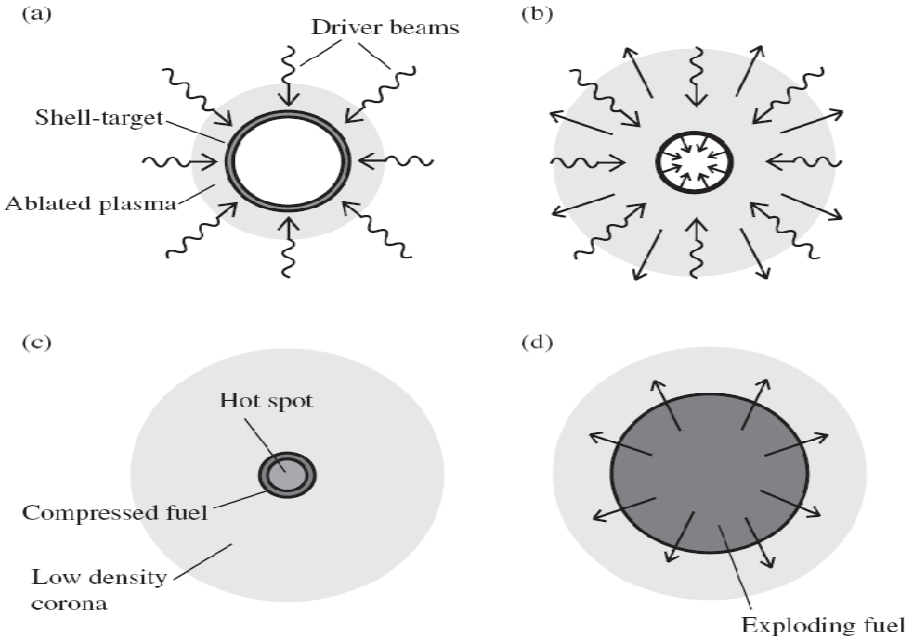
در تمام این روش ها دو فرآیند وجود دارد که مانع انجام محصورسازی ایده آل می شود. اولی برخورد هایی است که در پلاسما صورت می گیرد. اگرچه این برخوردها برای شروع فرایند همجوشی لازم اند، اما در مدت زمان طولانی به محصورسازی صدمه می زنند. وقتی دو ذره به هم برخورد می کنند به طور موقت از خطوط میدان خود جدا می شوند و به سمت خطوط میدان مجاور خود حرکت می کنند. بعد از انجام تعداد برخوردهای زیاد، ذرات می توانند از قسمت مرکزی به خارج بروند و به دیواره های چنبره اصابت کنند. فرایند دومی که باعث تضعیف محصورسازی می شود ناپایداری پلاسما[1] است. یک ناپایداری وقتی اتفاق می افتد که اختلال کوچک اولیه ای باعث افزایش اختلال شده و این موضوع همچنان ادامه می یابد. مثلا اگر پلاسمای چنبره ای شکل در یک نقطه، شعاع کمتری داشته باشد، میدان مغناطیسی در آن نقطه قوی تر می شود و باعث افزایش فشار و فشردگی بیشتر و در نتیجه کاهش شعاع در آن قسمت می گردد. این نقطه باعث آغاز یک ناپایداری می شود. به طور خلاصه، مسئله اصلی ما این است که عواملی را که مانع محصورسازی می شوند تا حد امکان کاهش دهیم و تا آنجا که می توانیم زمان محصورسازی پلاسما را طولانی کنیم تا بهره انرژی خالصی را از آن بگیریم. در حالی که در سال ۱۹۵۵ زمان محصورسازی فقط s $۱۰^{-۵}$ بود؛ امروزه این زمان به چند ثانیه رسیده است [۳].

۱-۵-۲- همجوشی محصور سازی اینرسی :

در مقابل همجوشی مغناطیسی که پلاسما را در چگالی کم $\left(\sim ۱۰^{۱۴}-۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}\right)$ تا چندین ثانیه محصور می کند، همجوشی اینرسی روش دیگری برای رسیدن به معیار لاوسون دارد. در این جا زمان محصورسازی، بسیار کم است $\left(<۱۰^{-۱۰}\ s\right)$ اما چگالی ذرات بسیار بالا است (جدول (۱-۲)). در این حالت مقدار کمی از ماده همجوشی کننده در چگالی بسیار زیاد متراکم می شود و دما هم بسیار بالا می رود. برای رسیدن به شرایط چگالی و دمای لازم برای انجام همجوشی، هدف باید در معرض انرژی زیادی قرار گیرد که تا حد امکان باید متقارن باشد. انرژی راه انداز[2] لازم برای راه اندازی کل فرایند بسیار زیاد است. برای گرم کردن یک کپسول سوخت[3] با قطر تقریبی یک میلی متر تا دمای $۱۰ KeV$ حدود $۱۰^{۵}\ J$ انرژی لازم لازم است که می توان آن را با یک پالس لیزری[4] یا باریکه یونی[5] ایجاد کرد. این موضوع ممکن است در ابتدا عملی به نظر نرسد، اما لازم است انرژی در چند پیکو ثانیه در لایه بیرونی هدف آزاد شود.

[1] Plasma instability
[2] Driver energy
[3] Fuel capsule
[4] Laser pulse
[5] Ion beam

همجوشی اینرسی اساسا شامل چهار مرحله است که در شکل (۱-۸) این مراحل را مشاهده می نمایید. در مرحله اول به دلیل انرژی زیادی که به لایه بیرونی هدف وارد می شود، لایه، گرم و یونیزه شده و فورا تبخیر می شود. این مرحله، فرایند قطع[1] نام دارد. به محض این که قسمت بیرونی تبخیر می شود، قسمت داخلی سوخت به دلیل بقای تکانه به سمت داخل، شتاب پیدا می کند و به سمت مرکز کره می رود. از جهاتی کپسول مانند راکت عمل می کند یعنی پدیده قطع، باعث شتاب می شود. همان طور که سوخت به سمت مرکز کره می رود داغ تر و چگال تر می شود تا به شرایط انجام واکنش گرما هسته ای می رسد. موج شوک[2] فشار سوخت را به چگالی و دمای لازم برای همجوشی می رساند و بنابراین احتراق در مرکز کپسول سوخت اتفاق می افتد. وقتی احتراق صورت گرفت، انرژی حاصل از همجوشی، فشار خارجی ایجاد می کند که خیلی زود تمام کپسول را در بر می گیرد و باعث انفجار از داخل[3] می شود.



شکل (۱-۸) : مراحل انجام محصور سازی اینرسی: a)تابش لیزر، b) شتاب معکوس، c) تشکیل لکه داغ، d) انفجار [۲].

زمان محصورسازی پلاسما اساسا به وسیله شعاع R کپسول تعیین می شود. وقتی حرکت درونی به وسیله موج فشار راه اندازی می شود تقریبا با سرعت صوت C_s حرکت می کند. زمان محصورسازی را می توان به وسیله نسبت شعاع کپسول R

[1] Ablation
[2] Shock wave
[3] Implosion

مثلا $100\ \mu m$ به سرعت صوت بدست آورد، $t_s = \frac{R}{C_s} = 10^{-9}\ s$. شبیه سازی های محاسباتی نشان می دهند زمان محصورسازی در حدود $10-20\ ns$ است.

در همجوشی اینرسی، شرط لاوسون را می توان به صورت نسبت چگالی سوخت ρ و شعاع کره R بیان کرد. برای یک کره زمان جداسازی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau \sim \frac{R}{4C_s} \qquad (1-8)$$

چگالی عددی[1] تعداد برای سوخت برابر است با $n = \frac{\rho}{m}$. با استفاده از معادله (۱-۶) برای معیار لاوسون داریم:

$$n\tau = \frac{nR}{4C_s} = \frac{\rho R}{4C_s m} \qquad (1-9)$$

اگر داشته باشیم $n\tau = 2\times10^{15}\ \ s\,cm^{-3}$، در این صورت خواهیم داشت :

$$\rho R \sim 3\ \frac{gr}{cm^2} \qquad (1-10)$$

کسر مصرف[2] ϕ_b در دمای $20-50\ KeV$ را برای DT می توان به صورت زیر نوشت :

$$\phi_b \sim \frac{\rho R}{H_B + \rho R} \qquad (1-11)$$

که در آن خواهیم داشت:

$$H_B = \frac{4C_s\left(m_D + m_T\right)}{\left\langle\sigma_v\right\rangle} \sim 7\ \frac{gr}{cm^2} \qquad (1-12)$$

که در آن m_D جرم دوتریم و m_T جرم تریتیم است. برای ۳۰ درصد مصرف سوخت، ρR باید با مقدار داده شده در معادله (۱-۱۰) برابر باشد. از سال های ۱۹۷۰-۱۹۶۰ میلادی، دانشمندان هسته ای فکر می کردند که ICF به سرعت پیشرفت می کند ولی به علت انرژی اولیه زیادی که لازم داشت در آن زمان غیر قابل دسترس به نظر می رسید. متأسفانه تمام انرژی به کار رفته را نمی توان برای احتراق استفاده کرد. قسمت زیادی از این انرژی به دلیل فرایند های اتلافی مختلف تلف می شود. این یعنی برای داشتن انرژی لازم برای همجوشی باید انرژی راه انداز اولیه بیشتر باشد و بنابراین بازده، افت می کند.

[1] Number density
[2] Burn fraction

۱-۶- مراحل انجام واکنش همجوشی محصور سازی اینرسی :

در شکل (۱-۸) مراحل انجام واکنش همجوشی محصور سازی لختی را مشاهده می کنید. این چهار مرحله عبارتند از [۴]:

۱. فاز برهم کنش[۱] باریکه با سطح هدف و تشکیل هاله[۲]
۲. فاز فشرده سازی[۳]
۳. فاز شتاب معکوس[۴]
۴. فاز احتراق و سوختن[۵]

فاز برهم کنشی، اولین فاز است که در آن انرژی به کپسول حاوی سوخت می رسد که می تواند توسط لیزر یا باریکه یونی ایجاد شود. در پدیده مربوط به انرژی ورودی، هیچ فرقی بین لیزر ها و باریکه های یونی وجود ندارد. جمله راه انداز به طور کلی به منبع انرژی در ICF گفته می شود. فرایند برهم کنش های اولیه در مورد باریکه های یونی و لیزری باهم متفاوتند. اساسا لیزر فقط با سطح ماده بر هم کنش دارد، در حالی که باریکه ها تا فاصله معینی در ماده نفوذ می کنند. بنابراین فرایند هایی که در فاز بر هم کنشی رخ می دهد بسته به نوع راه انداز متفاوت است. در هر دو مورد، هدف ما انتقال بیشترین انرژی ممکن و تبدیل آن به انرژی فشرده سازی می باشد.

در فاز فشرده سازی چند عامل موثر وجود دارد. مثلا شتاب باید به گونه ای باشد که تا حد امکان از تشکیل الکترون های داغ[۶] جلوگیری شود. اگر بخواهیم از راه انداز های لیزری استفاده کنیم باید از پیش گرمایشی که توسط الکترون های داغ صورت می گیرد جلوگیری کنیم. برای انجام این کار می توان از یک پالس اولیه با توان کم استفاده کنیم و سپس ردیفی از پالس های با شدت افزاینده را به کار بریم تا، سوخت بدون تغییر آنتروپی شتاب داده شود.

وقتی بخش داخلی سوخت به مرکز کپسول برسد فاز شتاب معکوس شروع شده و انرژی جنبشی بخش داخلی سوخت به انرژی اینرسی تبدیل می شود. در نتیجه دما و چگالی در مرکز و در جایی که بخش اصلی سوخت وجود دارد بالا می رود و باعث می شود سوخت اصلی پخش نگردد. در روش لکه داغ، سرعت سوخت باید به $۲\times۱۰^{۷}\ \frac{cm}{s}$ برسد تا دما و چگالی لازم برای رسیدن به احتراق را ایجاد کند. برای رسیدن به چگالی و دمای لازم در ناحیه لکه داغ، ردیفی از پالس های با شدت افزاینده را باید استفاده کنیم تا بدون تغییر آنتروپی به فشردگی لازم برسیم.

[2] Interaction phase
[2] Corona
[3] Compression phase
[4] Deceleration phase
[5] Ignition and burn phase
[6] Hot electrons

وقتی دما و چگالی در ناحیه لکه داغ به اندازه مورد نظر رسید، احتراق اتفاق می افتد. ذرات آلفای ایجاد شده انرژی خود را در این ناحیه داغ به نهشت می گذارند و باعث می شود این ناحیه به سرعت داغ شود. تابش نوترون های حاصل از همجوشی و رسانندگی گرمایی به وسیله الکترون ها، انرژی را از ناحیه لکه داغ به نواحی بیرونی سوخت منتقل می کند. دمای این ناحیه بیرونی به شدت افزایش می یابد، بنابراین واکنش همجوشی در این نواحی هم اتفاق می افتد و در تمام قسمت ها منتشر می شود. تمام این مراحل در مدت زمان ps ۱۰ اتفاق می افتد. در طی این زمان، فشار بالایی ایجاد می شود که سرانجام باعث انفجار باقیمانده سوخت می شود. این مرحله انتهای چرخه ICF است. در این مرحله، هدف بعدی تزریق و تمام فرایند دوباره تکرار می شود.

۱-۷- روشهای راه اندازی همجوشی محصور سازی اینرسی :

برای رسیدن به شرایط لازم برای انجام همجوشی اینرسی، دو نوع روش راه اندازی وجود دارد:

۱. راه اندازی مستقیم[1]
۲. راه اندازی غیر مستقیم[2]

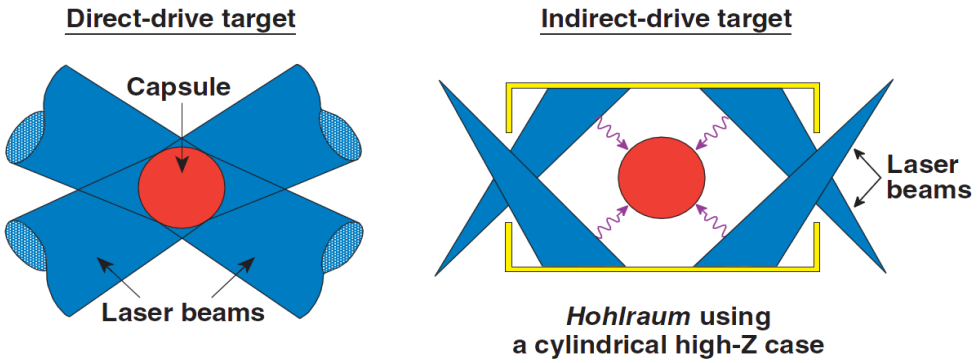
در روش راه اندازی مستقیم، کپسول سوخت مستقیما توسط لیزرها یا باریکه های یونی مورد اصابت قرار می گیرند و انرژی آنها مستقیما روی هدف به نهشت گذاشته می شود. در این نوع روش راه اندازی، فشردگی و گرمای لازم به وسیله به نهشت گذاشتن مقدار زیادی از انرژی در لایه بیرونی هدف بدست می آید شکل(۱- ۹).

در روش راه اندازی غیر مستقیم، انرژی مستقیما روی ساچمه سوخت به نهشت گذاشته نمی شود بلکه ابتدا باریکه های یونی یا لیزر ها انرژی خود را بر روی محفظه اطراف ساچمه سوخت که هولرام[3] نام دارد به نهشت می گذارند. این محفظه شامل ماده ای با عدد اتمی بالا است و وقتی توسط باریکه ها گرم می شود اشعه ایکس تابش می کند. در مرحله بعد این اشعه ایکس ها به طور کاملا یکنواخت بر ساچمه سوخت تابیده می شوند و باعث انفجار ساچمه سوخت می شوند شکل(۱- ۹). طراحی های اخیر به گونه ای است که ۸۰ – ۷۰ درصد انرژی باریکه ها در آنها به انرژی لیزر تبدیل می شود.

در این دو نوع روش راه اندازی، نکات مشترکی وجود دارد که با آنها مواجهیم. این نکات عبارتند از یکنواختی تابش، جفت شدگی انرژی باریکه بر روی هدف و ناپایداری های هیدرودینامیکی. در هر دو روش، تابش باریکه بر روی هدف باید یکنواخت باشد تا از ایجاد ناپایداری ریلی ـ تیلور[4] تا حد امکان اجتناب شود. تکنولوژی رسیدن به باریکه هایی با یکنواختی بالا نیز در هر دو مورد یکی از چالش هایی است که با آن مواجهیم. البته هر دو روش مزایا و معایبی دارند. در روش راه اندازی غیرمستقیم به

[1] Direct drive
[2] Indirect drive
[3] Hohlraum
[4] Rayleigh–Taylor instability

دلیل این که انرژی باریکه ها مستقیما به ساچمه سوخت برخورد نمی کند بازده جفت شدگی[1] تا حد بسیار زیادی افت پیدا می کند و به همین دلیل انرژی ورودی آن بالاتر می رود. همچنین هزینه ساخت هدف های راه انداز غیر مستقیم نیز به دلیل وجود هولرام بالاتر است. اما در این روش به دلیل تابش غیر مستقیم، یکنواختی تابش بسیار بالاتر است و به همین دلیل آهنگ ناپایداری هیدرو دینامیکی در این روش بسیار کمتر است و بهره هدف بالا می رود.



شکل (۱- ۹) : روش های راه اندازی مستقیم و راه اندازی غیر مستقیم [۴].

در روش راه اندازی مستقیم به دلیل این که باریکه ها انرژی خود را مستقیما در روی هدف به نهشت می گذارند بازده جفت شدگی بسیار بالاتر است و بهره هدف را بالا می برد. همچنین ساختار ساچمه سوخت در این روش ساده تر است و در نتیجه هزینه ساخت آن کمتر می باشد. اما بزرگترین مشکلی که در روش راه اندازی مستقیم با آن مواجهیم وجود ناپایداری ریلی ـ تیلور است که باید به گونه ای آن را تا حد امکان کاهش دهیم تا بتوانیم به بهره لازم برسیم. با افزایش تعداد باریکه های تابیده شده بر روی هدف می توان تا حد زیادی این اثر را کاهش داد. همچنین دقت در ساخت متقارن هدف و تابش متقارن باریکه ها بر روی هدف نیز تا حدی این اثر را کاهش می دهد.

در روش راه اندازی غیر مستقیم، نیاز به یکنواختی تابش بسیار کمتر است. غیر یکنواختی تابش در دو مقیاس میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک اتفاق می افتد. غیر یکنواختی ماکروسکوپیک مثلا می تواند به علت کافی نبودن تعداد باریکه ها و یا عدم توازن در باریکه ها باشد. یکی از دلایل غیر یکنواختی[2] میکروسکوپیک هم می تواند افت و خیز های فضایی درون یک باریکه خاص باشد. با وجود تمامی خصوصیات ذکر شده درباره این دو نوع روش راه اندازی، هنوز معلوم نیست که کدام روش برای نیروگاه و تولید انرژی همجوشی مناسب تر است و هنوز آزمایش های زیادی در حال انجام است.

[1] Coupling efficiency
[2] uniformity

۱-۸-روشهای احتراق در همجوشی محصورسازی اینرسی :

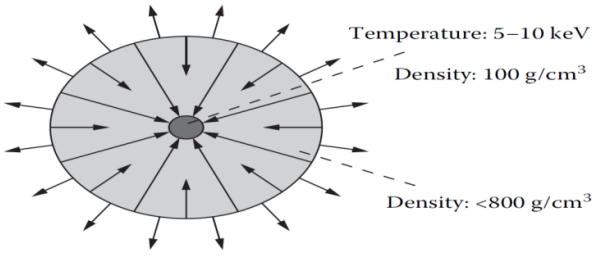
دو نوع روش در ایده ی همجوشی محصور سازی اینرسی برای فشرده سازی سوخت و رساندن آن به مرحله ی احتراق وجود دارد که در زیر هر یک را به اختصار نشان می دهیم :

۱-۸-۱- احتراق حجمی :

یکی از مراحل مهم در همجوشی اینرسی، روش رسیدن به فشردگی، دما و فشار مناسب است. در تحقیقات ICF، به این موضوع توجه شده است که تمام سوخت باید در انتهای فاز فشرده سازی به شرایط همجوشی برسد. این ایده را احتراق حجمی[1] می نامند. چنین روشی به انرژی راه انداز اولیه بسیار بالایی MJ ۶۰ نیاز دارد. در این جا دو نکته کلیدی وجود دارد: ۱) انرژی لازم برای گرم کردن بیشتر از انرژی لازم برای فشرده سازی است. ۲) فشرده سازی مواد داغ نسبت به مواد سرد انرژی بیشتری مصرف می کند.

۱-۸-۲- ایده ی ناحیه لکه داغ :

در این روش، سوخت با سرعت افزایشی به سمت داخل حرکت می کند و حرکت آن با نهشت انرژی توسط راه انداز آغاز می شود. نتیجه چنین شتابی این است که بخش داخلی سوخت به صورت بی دررو نسبت به بخش بیرونی با دمای KeV ۱به دمای بالاتری با دمای $(۵-۱۰KeV)$می رسد. هر دو بخش به چگالی بالایی می رسند و فشرده می شوند، اما قسمت داخلی با چگالی حدود $\frac{gr}{cm^۳}$ ۱۰۰نسبت به قسمت بیرونی با چگالی بیش از $\frac{gr}{cm^۳}$ ۸۰۰چگالی کمتری دارد. چگالی کمتر بخش داخلی به این دلیل است که سوخت در آغاز شتابدهی به سمت داخل حرکت می کند.



شکل (۱-۱۰) : نمایی از روش احتراق لکه داغ [۱].

در روش همجوشی لکه داغ، مصرف مواد همجوشی کننده در ناحیه مرکزی آغاز می شود که تقریبا μm ۱پهنا دارد و زمان آن هم در حدود ps ۲۰۰–۱۰۰است. سپس در مرکز سوخت، واکنش گرما هسته ای رخ می دهد و به سرعت به

[1] Volume ignition