پوهنتون پولی‌تخنیک کابل
مجله علم و تکنالوژی
جلد ٥٤ – شماره ٢
سنبله – سال ١٤٠٥ – هـ.ش.
تاریخ دریافت اثر: ١٤٠٥/٠٣/٠٢
تاریخ قبولی اثر: ١٤٠٥/٠٥/١٧
P-ISSN: 2305 - 896X
KPU-JST

په انشقاقي ریکتورونو کې د پرمختللو هستوي سون توکو پرتلیزه ارزونه

نامزد پوهنیار نورالله فیض الباری[1]*، پوهاند احسان الله ثاقب[2]، پوهاند محمد داود احمدزی[3]

[1]* د کابل پولي تخنیک پوهنتون د الکترومیخانیک پوهنځي د فزیک څانګې استاد ایمیل ادرس faizulbari٢٠١٩@gmail.com

٢ـ د ننګرهارپوهنتون د ښوونې او روزنې پوهنځي فزیک څانګې استاد ایمیل ادرس ihsanullahsaqib٣٠٤٣@gmail.com

٣ـ د کابل پولی تخنیک پوهنتون د الکترومیخانیک پوهنځي د فزیک څانګې استاد ایمیل ادرس d.ahmadzai@kpu.edu.af

لنډیز

متداولو اکسایډي سون‌توکو د وړانګو له امله د خپل حرارتي هدایت وړتیا (٧٠٪) له لاسه ورکوله او د ریکتور مرکز (Reactor Core) د ویلې کېدو خطر یې زیات دی، نو دا څېړنه د خوندیتوب لوړولو لپاره طرحه شوې ده. اساسي هدف د یورانیم، توریوم او ترینزو سون‌توکو ځانګړتیاوو پرتله ییز تحلیل ده، ترڅو د ریکتور محاسباتي ننګونې حل کړي. په نړۍ کې د برېښنا د تولید مختلفې سرچینې شتون لري کوم چې ځینې یې د برېښنا د تولید پرمهال کاربن تولیدوي. دبرېښنا د تولید هغه سرچینې چې کاربن نه تولیدوي دبرېښنا د تولیدد ټولو سرچینو (٧٣٪) برخه جوړوي. هستوي انرژي د بریښنا د تولید د هغومهمو او بنسټیزو سرچینو له ډلې څخه ده چې دبرېښنا د تولید پرمهال کاربن نه تولیدوي.

دغه څېړنه د پرتلیز- مروري میتود له مخې ترسره شوه چې پکې ټول معلومات له ثانوي سرچینو او د (International Atomic Energy Agency) راپورونو څخه په سیستماتیک ډول راټول شول.

موندنو په ډاګه وښودله چې توریوم د (٣٣٩٠) سانتي ګراد درجو د ویلې کېدو خورا لوړ تکي او غوره هدایت لرلو سره حرارتي ثبات زیات کړ او لس چنده کم درانه اکتنایدونه یې تولید کړل. ثابته شوه چې د سلیکان کاربایډ پرمختللو محافظتي وسایلو (Accident Tolerant Fuel) تر (١٧٠٠) درجوسانتي ګراد پورې خپل میخانیکي ثبات وساته او په سختو شرایطو کې یې د هایډروجن چاودېدونکی تولید نږدې صفر کړ.

په پای کې، دې څېړنې ثابته کړه چې د توریوم، حادثې ضد محافظتیپوښونو او ترینزو (Tri-Structural Isotropic) ذروترکیب نه یوازې د فوکوشیما په څېر د سختو پېښو خطر له منځه یووړ، بلکې هستوي انرژي یې بیا په یوه خوندي او نه خپرېدونکې سرچینې بدله کړه چې د اقلیمي بدلون په مدیریت کې یې بنسټیز رول په بریالیتوب ولوباوه.

کلیدي تکي: هستوي انرژي، TRISOسون توکي، حرارتي هدایت، حرارتی تحلیل، هستوي ریکتور

[1]* مولف مسوول

سریزه

اوس مهال په نړۍ کې د برېښنا نړدې ۷۳ سلنه برخه دهغو سرچینو په واسطه تولیدېږي چې کاربن نه تولیدوي،کوم چې هستوي انرژي د کاربن د نه تولید او د انرژۍ د خورا لوړ کثافت له امله په کې ځانګړی ځای لري. په اوسنیو سوداګریزو ریکټورونو کې د یورانیم دای اکساید (UO_2) سون توکي د تودوخې دتولید لپاره په فونونونو (Phonons) یا په کریستالي شبکه کې په ارتعاشي څپو تکیه کوي. مګر د ریکتور دننه د سختو وړانګو او لوړې تودوخې له امله په کریستالي شبکه کې د نیمګړتیاوو رامنځته کېدل د فونونونو د خپرېدو او په پایله کې د سون توکو د کار په جریان کې د تودوخې هدایت وړتیا (Thermal Conductivity) تر (۷۰) سلنې پورې راکموي [٦].

د ۲۰۱۱ م کال د فوکوشیما (Fukushima Daiichi) له حادثې وروسته، نړیواله پاملرنه د داسې سون توکو او محافظتي پوښونو رامنځته کولو ته واوښته چې د سختو حادثو پر وړاندې مقاومت ولري، ترڅو د هایدروجن تولید کم او د سون توکو د ویلې کېدو مخه ونیول شي [۲] ,[۹] . په دې لړ کې د توریوم پر بنسټ سون توکي د یورانیم په پرتله د لوړ ویلې کېدو ټکي، لوړ حرارتي هدایت وړتیا او د لږو اکتنایدونو د تولید له امله د یو غوره بدیل په توګه مطرح دي [۸],[٤].

همدارنګه، تریزو (TRISO) یا (Tristructural Isotropic) سون توکي چې له څو مایکرو محافظتي طبقو څخه جوړ شوي، د اتومي پاتې شونو په ساتلو او حتی په خورا لوړه تودوخه کې د خپل ثبات په ساتلو کې خورا اغېزمن ثابت شوي دي[۳],[۸] . سره له دې چې پرمختللي سون توکي لکه بشپړ پوښ شوي سون توکي یا (Fully Ceramic Microencapsulated) ډېرې ګټې لري، خو په هغوی کې د ذراتو دوه ګونی غیر متجانس والی (Double Heterogeneity)د نیوترونیکي او انرژیکي محاسباتو دقت له ننګونو سره مخ کوي[۲] .

د دغو پېچلو سون توکو د چلند دقیقې وړاندوینې او د هغوی د ناکامۍ پېژندنه پرمختللو کمپیوټري ماډلونو لکه مونټي کارلو(Monte Carlo) یا کمپیوټری محاسبې، د ماشین زده کړې (Machine Learning) الګوریتمونو او د وړانګو د جذب دقیقو تصویري تخنیکونو ته اړتیا لري[۱۵],[۳] . له همدې امله، د یورانیم، توریوم او تریزو سون توکو د فزیکي، حرارتي او نیوټرونیکي ځانګړتیاوو منظم او پرتلیز تحلیل د اټومي انرژۍ د تولید د خوندیتوب او موثریت لپاره حیاتي ارزښت لري. په دې څېړنه کې هڅه شوې چې د یادو سون توکو د تودوخې هدایت میکانېزمونه، د نیوترونیکي فزیک اغېزې او د حادثو پر وړاندې د هغوی مقاومت د معتبرو علمي ماخذونو په رڼا کې په پرتله ییز ډول وڅېړل شي.

زما د څېړنې تشه یا خلا په خورا سختو شرایطو کې د پرمختللو سون توکو د چلند په اړه د دقیقو معلوماتو نشتوالی او د هغوی د خوندیتوب ثابتولو لپاره دهر اړخیزو تحلیلونواو له متداولو یکتورونو څخه نوي سیستم ته د انتقال د پراوونو روښانه کېدل دي.

د څېړنې موخې

د یورانیم دای اکساید(UO_2) ، توریوم او تریزو سون توکو د ځانګړتیاوو لکه حرارتي هدایت وړتیا او میخانیکي ثبات ترمنځ د توپیرونو پرتله کول او د ریکټور په خوندي فعالیت کې د هغوی د اغېزمنتوب روښانه کول.

په غیر متجانسو ماتریسونو لکه (FCM) سون توکوکې د نیوټرونیکي او حرارتي چلند د وړاندوینې دقت ارزول او د هغو ننګونو څېړل چې د ذراتو د دوه ګوني غیر متجانس والي له امله په محاسباتي ماډلونو کې رامنځته کېږي.

تیرو آثارو ته کتنه

د Du Toit په نامه څېړونکي ثابته کړې ده چې توریوم دای اکسایډ (ThO_2) د یورانیم دای اکساید (UO_2) په پرتله لوړ حرارتي هدایت او د ویلې کېدو خورا لوړ ټکی $3390^{\circ}C$ لري [٤]. دا سون‌توکي د یورانیم په پرتله تر لس چنده لږ درانه اکتنایدونه تولیدوي چې د هستوي کثافاتو مدیریت خورا اسانه کوي [١],[٨]. د Li او Rebak په څېړنو کې ښودل شوې چې پر زیرکونیم محافظتي پوښونو باندې د حادثې ضد سون توکو لګول د اکسیډیشن سرعت ۲۵ ځله راکموي او د هایدروجن د تولید مخه نیسي [١١] ,[٩]. همدارنګه، د سیلیکان کاربایډ(SiC) ترکیبات حتی د سانتی ګراد تر ۱۷۰۰ درجو پورې خپل ثبات ساتي او د هایدروجن تولید نږدې صفر کوي. [٢]. Dhulipala په خپلو څېړنو کې په ډاګه کړه چې تریزو ذرات له یوې هستې او څلورو مایکرو محافظتي طبقو څخه جوړ شوي چې حتی په خورا لوړه تودوخه(د سانتی ګراد ١٦٠٠ درجو) کې هم رادیو اکټیو مواد په خپل ځان کې ساتي. نوموړی ویل کله چې دغه ذرات په یو سیلیکان کاربایډ ماتریس کې ځای پر ځای یش، هغوی ته (FCM) سون‌توکي ویل کېږي چې میخانیکي اعتبار یې خورا لوړ دی د Dhulipala او Xu کارونه ښیي چې د ماشین زده کړې کارول د تریزو ذراتو د دوه ګوني غیر متجانس والي پېچلې محاسبې او د سون‌توکو د ناکامۍ احتمال په دقیق ډول حل کړي دي[١٥],[٣] . Wainwright او Rochman د ریکټور څخه تر ډیپو(ګودام) (Repository) پورې چوکاټونه رامنځته کړي ترڅو د مصرف شویو موادو چاپېریالي اغېزې او د هغوی د پاتې شونو حرارتي چلند تحلیل کړي [١٢],[١٣] د متداولوسون‌توکو د حرارتي تخریب او محاسباتي پېچلتیاو په شتون کې، ایا د توریوم، تریزو او (ATF) موادو ترکیب کارول کولی شي هستوي انرژي په یوه داسې خوندي او پایداره سیستم بدله کړي چې هم امنیتي ننګونې حل کړي او هم د اقلیمي بدلون په مدیریت کې اغېزمن ثابت شي.

١. د اکسایډي سون‌توکو هستوي تخریب

په اوسنیو هستوي ریکټورونو کې د انرژۍ د تولید موثریت او خوندیتوب په مستقیم ډول په سون توکو کې د تودوخې د هدایت (Thermal Transport) په وړتیا پورې تړلی دی[٢],[٦] . په سوداګریزو سپکو اوبو ریکټورونو (LWRs) کې ،یورانیم ډای اکسایډ (UO_2) د اصلي سون توکي په توګه کارول کېږي، چې په هغې کې د تودوخې هدایت په بنسټیز ډول پر فونونونو (Phonons) یا په کریستالي شبکه کې پر ارتعاشي څپو تکیه کوي. ځرنګه چې په اکسایډي سون توکو کې آزاد الکترونونه کم وي، نو فونونونه د حرارتي انرژۍ یوازیني هدایتوونکي ګڼل کېږي .مګر کله چې دا سون توکي د ریکټور دننه تر سختو وړانګو او لوړې تودوخې لاندې راځي، په کریستالي شبکه کې بې شمېره نیمګړتیاوې لکه خالي ځایونه ، یا منځنی خلاوې او د انشقاقي محصولاتو (Fission Products) پاتې شوني رامنځته کېږي. دا نیمګړتیاوې فونونونه خپروي، چې په پایله کې یې د وخت په تېرېدو سره د سون توکو حرارتي هدایت وړتیا تر ۷۰ سلنې پورې راکمېږي[٦] .

د دې ننګونې د حل لپاره، توریوم دای اکساید (ThO_2) د یو غوره پرمختللي سون توکي په توګه پېژندل شوی دی. توریوم د یورانیم په پرتله لوړ حرارتي هدایت وړتیا لري او د هغې د ویلې کېدو ټکی خورا لوړ (۳۳۹۰ سانتي ګراد درجې) دی، چې په ریکټور کې حرارتي ثبات زیاتوي او د سون توکو د مرکز د ویلې کېدو خطر کموي کوم چې د ریکتور د مرکز د ویلی کیدو لامل ګرځي. همدارنګه، توریوم دای اکساید له کیمیاوي اړخه ډېر ثبات لري او په لوړه تودوخه کې له اوبو یا هوا سره د تعامل پر مهال خپله بڼه لږ بدلوي([٦],[٤]) په اکسایدي سون توکو کې د تودوخې د هدایت میکانېزمونه د عصري تکنالوژیو لکه د نیوترون د درې اړخیزې خپرېدو په واسطه څېړل شوي، چې ښیي په UO_2 کې صوتي فونونونه او د لوړې انرژۍ لوړ طول موج لرونکي فونونونه د تودوخې په هدایت کې اساسي رول لري[٦].

۲. د پرمختللو هستوي موادو خوندیتوب

د ۲۰۱۱ کال د فوکوشیما (Fukushima Daiichi) له حادثې وروسته، د اټومي انرژۍ د صنعت ترټولو لوی لومړیتوب د داسې موادو رامنځته کول دي چې د سختو پېښو پر وړاندې مقاومت ولري [۲],[۹] . د دې تکنالوژۍ اصلي هدف دادی چې په ریکټور کې د یخولو سیستم د لاسه ورکولو (LOCA) په صورت کې، د سون توکو او کلاډینګ (محافظتي پوښ) ترمنځ د هایدروجن تولید کم کړي او د رادیو اکټیو موادو د خپراوي مخه ونیسي [۱۱],[۹] . دودیز زیرکونیم الیاژ (Zircaloy) په لوړه تودوخه کې له بخار سره په چټکۍ تعامل کوي او ډېر هایډروجن تولیدوي چې د چاودنې لامل کېږي[۲],[۱۱] .

د دې ستونزې لپاره د پرمختللو محافظتي پوښونو درې اساسي لارې وړاندیز شوې دي: لومړی، پر زیرکونیم پوښونو باندې د کرومیم (Cr) په څېر د محافظتي طبقو لګول؛ دوهم، د(FeCrAl) الیاژو کارول چې تر ۱۵۰۰ سانتي ګراد درجې پورې د بخار پر وړاندې خورا مقاومت لري او دریم، د سلیکان کارباید (SiC) مرکبات کارول چې حتی تر ۱۷۰۰ سانتي ګراد درجې پورې خپل ثبات ساتي [۲],[۱۱],[۹] . د کرومیم کوټینګ(Cr-coated cladding) یا د حادثې ضد سون توکي یو له نړدې مهاله حل لارو څخه دی چې کولای شي د هایدروجن تولید په شدت سره راکم کړي او دمحافظتي پوښ میخانیکي قوت زیات کړي[۱۱],[۹] .

له بلې خوا، تریزو سون توکي چې له یورانیم یا توریوم او څو مایکرو محافظتي طبقو (پیرولیټیک کاربن او سیلیکان کارباید) څخه جوړ شوي، د هستوي صنعت ترټولو خوندي ډیزاین ګڼل کېږي [۲],[۸] . دا ذرات په انفرادي ډول د هستوي پاتې شونو په ساتلو کې خورا پیاوړي دي او حتی د یخولو سیستم په بشپړډول له لاسه ورکولو سره هم نه ویلې کېږي [۹],[۸]. کله چې دا تریزو ذرات په یو سیلیکان کارباید ماتریس کې ځای پر ځای شي، ورته بشپړ پوښل شوي سون توکي ویل کېږي [۲],[۹] . په (FCM) سون توکو کې د حرارت هدایت وړتیا خورا لوړه ده او د سون توکو د مرکز تودوخه د دودیزو اکسایډونو په پرتله ډېره ټیټه وي [۲],[۹].

کړنلاره

دا څېړنه د مقایسوي او مروري میتود پر بنسټ ترسره شوې چې اساسي هدف یې په انشقاقی ریکتورونو کې د پرمختللو هستوی سون توکو مقایسوي او مروري ارزونه ده. د څېړنې معلومات یوازې په انګیسي ژبه له ثانوي سرچینو څخه راټول شوي چې پکې له معتبر ژورنالونو لکه Science Direct, Progress in Nuclear Energy, Elsevier, Web of Science

, Scopus څخه معلومات را اخیستل شوي، او د هستوی فزیک اړوند معتبر علمي ژورنالونو لکه Progress in Nuclear Energy، Journal of Nuclear Materials ، او Massachusetts Institute of Technology تر استفادې لاندې نیول شوي دي. ما د خپلې څېړنې لپاره لومړی په هستوي او اتومي برخه کې د ریکتورونو موضوع وټاکله کوم چې په یاده موضوع کې په ګڼ تعداد نړیوالې مقالې ،کتابونه او راپورونه موجود ول. ددې لپاره چې د څېړنې ساحه رامحدوده کړم نو بیا مې د انشقاقي ریکتورونو موضوع وټاکله. مګر بیا هم په یاده برخه کې د زرګونو په شاخوا مقالې او کتابونه موجود ول. بیا مې ددویم ځل لپاره د خپلې څېړنې ساحه نوره هم رامحدوده کړه او د (په انشقاقي ریکتورونوکې د پرمختللو هستوي سون توکو پرتلیزه ارزونه) تر عنوان لاندی موضوع مې وټاکله کوم چې یاد عنوان محدود شمیرې(٤٦) مقالې درلودلې او زما د موضوع له عنوان سره د ډېر نیږدې ارتباط او تازه نشر په سبب د هغوی له جملې څخه ما د خپلې څېړنې لپاره (١٥) وټاکلې او د سریع مرور له مخې مې کولای شول یوه علمي نتیجه په لاس راوړم.

د څېړنې موضوع او نتایج

١. د توریوم پر بنسټ سون‌توکو فزیکي او نیوټرونیکي غوره والی:

- فزیکي او حرارتي ګټې

توریوم ډای اکسایډ (ThO_2) د یورانیم ډای اکسایډ په پرتله خورا لوړ ویلې کېدو ټکی (۳۳۹۰ سانتي ګراد درجې) لري، چې په ریکټور کې د سون‌توکو د خوندیتوب کچه زیاتوي او د سون توکي د مرکز د ویلې کېدو خطر په ښکاره ډول راکموي. دا پروسې ریکټور ته اجازه ورکوي چې له هغو موادو څخه انرژي تولید کړي چې په طبیعي ډول په خپله انشقاق نه کوي کوم چې په لاندې معادلاتو کې توضح شوي دي؛ په ځانګړي ډول د توریوم دوره (۲) شمیره معادله ځکه مهمه ده چې د یورانیم په پرتله لس چنده لږ درانه اکتینایدونه تولیدوي او د هستوي وسلو د جوړولو پر وړاندې طبیعي امنیتي خنډونه رامنځته کوي.[٤],[٨]

$$^{۲۳۸}_{۹۲}U + n \rightarrow ^{۲۳۹}_{۹۲}U + \beta^- \rightarrow ^{۲۳۹}_{۹۳}Np + \beta^- \rightarrow ^{۲۳۹}_{۹٤}Pu \qquad (۱)$$

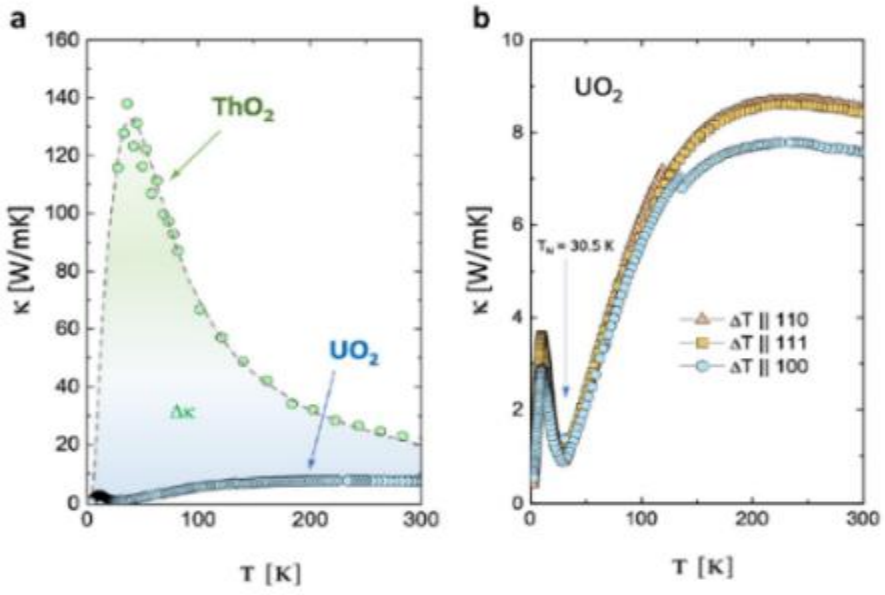
$$^{۲۳۲}_{۹۰}Th + n \rightarrow ^{۲۳۳}_{۹۰}Th + \beta^- \rightarrow ^{۲۳۳}_{۹۱}Pa + \beta^- \rightarrow ^{۲۳۳}_{۹۲}U \qquad (۲)$$

(۱) شمیره معادله ښیي چې ځنګه په ریکتور کې د نیوترونونو په واسطه په انشقاقي توکو بدلیږي.

څېړنې ښیي چې دا سون‌توکي د یورانیم په پرتله لوړ حرارتي هدایت وړتیا لري د حرارتی هدایت معادله په لاندی ډول وړاندې کېږي [٦] :

$$\kappa = \frac{۱}{۳}\sum_{qs} C_{qs} v_{qs}^{۲} \tau_{qs} \qquad (۳)$$

په پورتنی معادله کې κ د حرارتي هدایت وړتیا، C_{qs} د فونون مخصوصه تودوخه، v_{qs} د د فونون سرعت، τ_{qs} د فونون د ژوند موده ده.



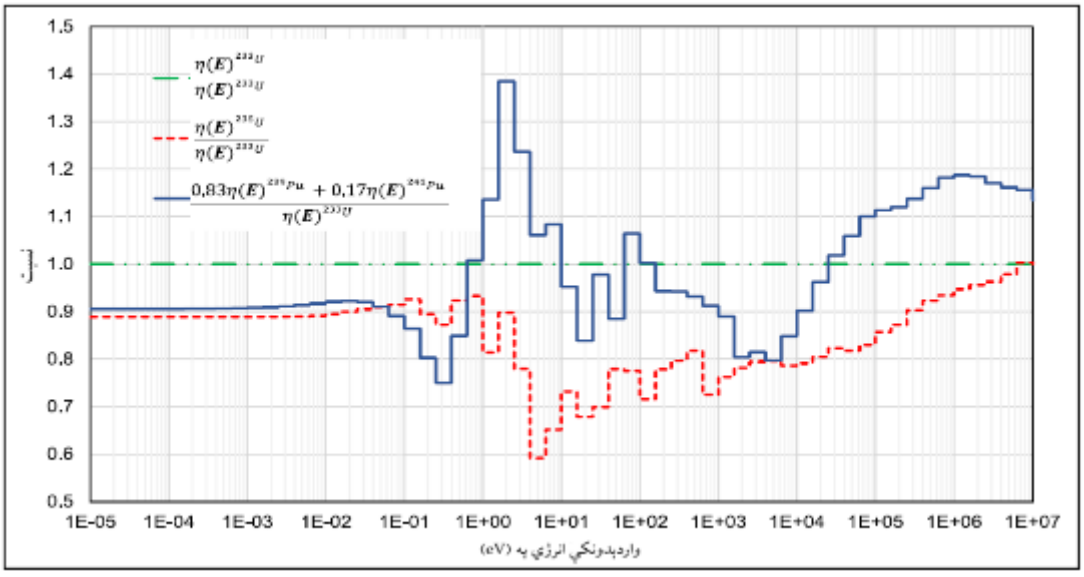
۱ انځور. (a) د ThO_2 (شنې دایرې) او UO_2 (آبي دایرې) د واحدو کریسټالونو حرارتي هدایت چې د ⟨۱۰۰⟩ کریسټالوګرافیک جهت په اوږدو کې اندازه شوی دی. د ThO_2 او UO_2 ترمنځ د حرارتي هادیت κ(T) او د هغې د مقدار مهم توپیرونه باید په پام کې ونیول شي. (b) د UO_2 د واحد کریسټال د حرارتي هادیت د تودوخې تابعیت، چې د ⟨۱۰۰⟩، ⟨۱۱۰⟩ او ⟨۱۱۱⟩ کریسټالوګرافیک جهتونو په اوږدو کې اندازه شوی دی[٦]

د تودوخې دا غوره هدایت د سون توکو د پیلټ (Pellet) یا د سون توکو واحد په مرکز کې تودوخه ټیټه ساتي، چې په پایله کې یې د فښن ګازونو تولید، پرسوب (Swelling) او د سون توکو او پوښ ترمنځ میخانیکي تعاملات (PCMI) راکمږي [٦]،[٤]. له کیمیاوي پلوه، توریوم دای اکساید ډېر مستحکم دی او د اوبو یا هوا پر وړاندې د اکسدیشن لوړ مقاومت لري[٤] ;[١١] .

- نیوترونیکي او امنیتي ګټې

په حرارتي ریکټورونو کې U-۲۳۳ د نیوترون تولید کچه لوړه ده، چې دا په سپکو اوبو ریکټورونو (LWRs) کې د سون توکو د نسل تولید یا Breeding امکان برابروي [٨]،[٤]. له چاپیریالي پلوه، د توریوم دوره د یورانیم په پرتله تر لس چنده کم درانه اکتنایدونه (Minor Actinides) تولیدوي، چې د هستوي کثافاتو مدیریت اسانه کوي [٤]،[٨]. د امنیت په برخه

کې، په دې دوران کې تولیدېدونکی U-۲۳۲ د پیاوړو ګاما وړانګو لکه (Tl-۲۰۸) لامل ګرځي، چې د موادو پټول ستونزمن کوي او د هستوي وسلو د جوړولو پر وړاندې یو طبیعي امنیتي خنډ رامنځته کوي [٤]،[٨].



۲ انځور. د $U^{۲۳۵}$ د تودوخیز انشقاق فکتور پرتله د $U^{۲۳۳}$ د تودوخیز انشقاق له فکتور سره [٤]

۱ جدول. د $Th^{۲۳۲}_{۹۰}$ او $U^{۲۳۲}_{۹۲}$ د تجزیې محصولات؛ تجزیه د AVR سون کرو د go۱ ډول له مخې[۸]

g/FE type AVR-GO1	Burnup		
isotope	5% FIMA	10% FIMA	15% FIMA
Tl-208	3.01E-15	4.16E-14	2.17E-13
Pb-208	2.49E-10	9.57E-09	1.15E-07
Pb-212	1.75E-12	2.41E-11	1.26E-10
Bi-212	1.65E-13	2.30E-12	1.20E-11
Rn-220	2.66E-15	3.68E-14	1.92E-13
Ra-224	1.52E-11	2.10E-10	1.18E-09
Ra-228	2.18E-10	5.30E-10	9.46E-10
Ac-228	2.28E-14	5.53E-14	9.88E-14
Th-228	3.09E-09	4.08E-08	2.13E-07
Th-232	4.93E+00	4.85E+00	4.73E+00
Pa-231	1.05E-05	2.39E-05	3.89E-05
Pa-233	3.85E-03	2.95E-03	2.64E-03
U-232	1.00E-06	5.68E-06	1.74E-05
U-233	3.51E-02	7.20E-02	9.47E-02
U-234	1.07E-02	1.37E-02	2.12E-02
U-235	6.61E-01	3.34E-01	1.07E-01
U-236	6.17E-02	1.18E-01	1.49E-01
U-238	6.41E-02	6.20E-02	5.86E-02
Pu-238	5.51E-05	7.20E-04	3.16E-03
Pu-239	4.97E-04	6.12E-04	9.76E-04
Pu-240	2.23E-04	4.88E-04	8.10E-04
Pu-241	5.76E-05	2.20E-04	3.92E-04
Pu-242	8.53E-06	1.13E-04	4.36E-04
Am-241	8.37E-07	9.27E-06	2.83E-05
Am-242m	6.24E-09	1.01E-07	3.44E-07
Am-243	2.47E-07	9.97E-06	8.26E-05
Cm-242	4.18E-08	9.53E-07	3.51E-06

۲. د حادثو پر وړاندې د مقاومت لرونکو محافظتي پوښونوفعالیت

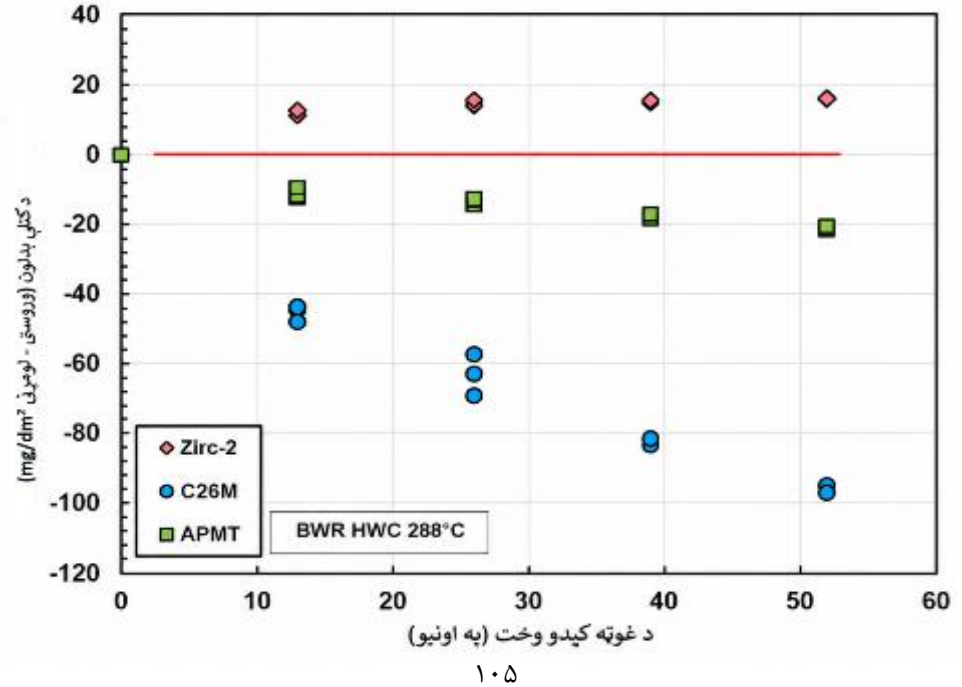
د ۲۰۱۱ کال د فوکوشیما له حادثې وروسته، د هستوي صنعت اصلي تمرکز د داسې محافظتي پوښونو پر رامنځته کولو دی چې په لوړه تودوخه کې له اوبو یا بخار سره لږ تعامل وکړي او د هایدروجن تولید کم کړي. د دغو پرمختللو موادو فعالیت په ریکتور کې د خوندیتوب وخت زیاتوي.

- پر زیرکونیم پوښل شوي محافظتي پوښونه

دا یوه نږدې مهاله (Near-term) حل لاره ده چې پکې پر اوسنیو زیرکونیم پوښونو باندې د کرومیم (Cr) په څېر محافظتي طبقې لګول کېږي[۱۱]،[۹] . موندنې ښیي چې په کرومیم پوښل شوي د اکسدیشن سرعت تر ۲۵ ځله پورې راکموي، د محافظتي پوښ پرسوب او چاودېدل (Ballooning/Burst) ځنډوي او د هایدروجن د نفوذ مخه نیسي[۱۱]،[۹] .

۲ جدول. د ATF سون‌توکو د محافظې پوښ (cladding) لپاره د FeCrAl الیاژونه [۱۱]

اسمي یا معیاري ترکیب د کتلې د سلنې له مخې	الیاژ
Fe-21Cr-5.8Al	APM
Fe-21Cr-5Al-3Mo	APMT
Fe-12Cr-6Al-2Mo	C26M
Fe-12Cr-6Al	NFD ODS
Fe-19Cr-5Al	Aluchrom YHf



۳ انځور. د Zirc-۲ ، C۲٦M او APMT ټیوب نمونو د وزن بدلون د ډوبېدو یا غوټه کېدو د وخت د تابع په توګه، په خالصو اوبو کې د ۲۸۸ °C تودوخې او ۳۰۰ ppb هایدروجن ګاز (HWC) په شتون کې [۱۱]

- د FeCrAl الیاژو فعالیت

(FeCrAl) الیاژ لکه (APMT) او(C۲٦M) د المونیم اکساید د یوې نښلېدلې او غیر فعالې(inert) طبقې په جوړولو سره تر (۱۵۰۰) درجې سانتي ګراد پورې د بخار پر وړاندې خورا لوړ مقاومت لري[۹]،[۱۱] . که څه هم دا مواد د زیرکونیم په پرتله نیوټرونونه ډېر جذبوي، مګر د لوړ میخانیکي قوت له امله د هغوی ضخامت له (۰,٦) ملي متر څخه (۰,۳) ملي متر ته راکمېدلی شي چې دا ستونزه حلوي[۲]،[۷]،[۱۱] .

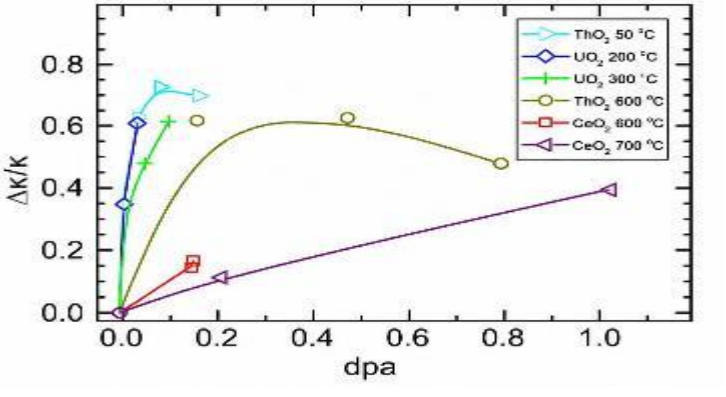
۳. په اکسایدي سون‌توکو کې د حرارتي هدایت او وړانګو د تخریب تحلیل

په هستوي اکسایدي سون‌توکو لکه یورانیم دای اکساید (UO_2) او توریوم دای اکساید (ThO_2) کې، د تودوخې هدایت میکانېزم په بنسټیز ډول پر فونونونو (Phonons) یا د کریستالي شبکې پر ارتعاشي څپو ولاړ دی، ځکه چې په دغو سرامیکي موادو کې ازاد الکترونونه خورا کم وي [٦] . موندنې ښیي چې د ریکتور د فعالیت پر مهال د انشقاق (Fission) محصولات او لوړه انرژي په کریستالي جوړښت کې بې شمېره نیمګړتیاوې (Defects) رامنځته کوي[٦] .

- د وړانګو له امله د حرارتي هدایت کموالی

کله چې سون توکي تر سختو وړانګو لاندې راځي، رامنځته شوې نیمګړتیاوې لکه خالي ځایونه او انټرسټیشلونه د فونونونو د خپرېدو مرکزونه ګرځي [٦]. دا پروسه د سون‌توکود ژوند په اوږدو کې د هغوی حرارتي هدایت وړتیا تر (۷۰) سلنې پورې راکموي[٦] . تودوخې د هدایت دا کموالی په سون توکو کې د ذخیره شوې انرژۍ د زیاتوالي او د سون توکي د مرکز د تودوخې د خطرناکې لوړېدو لامل ګرځي، چې په پایله کې یې د سون‌توکو د ناکامۍ احتمال زیاتېږي [٦]،[۹].

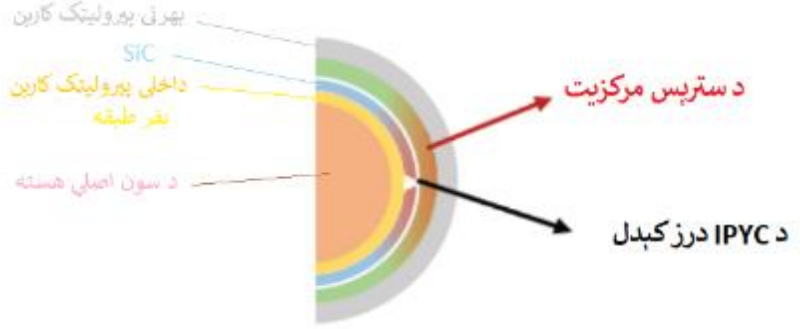
لاندې ګراف په واضح ډول سره ښیي چې د وړانګو دزیان (dpa) په ډېرېدو سره د حرارتي هدایت وړتیا هم راکمېږي؛ په ګراف کې لیدل کیږي چې د ځینو موادو لپاره دا کموالی ۷۰ سلنې ته رسېږي.



٤ انځور. په ایون- وړانګو اغېزمنو فلورایټونو کې د حرارتي هدایت د اندازه‌ګیري[٦]

٤. د تریزو او بشپړ پوښل شوو سون‌توکو میخانیکي او محاسباتي اعتبار

تریزو ذرات د هستوي صنعت د یو خورا باوري سون توکي په توګه پېژندل کېږي، چې له یو مرکزي هستې او څلورو مایکرو محافظتي طبقو (Buffer, IPyC, SiC, OPyC) څخه جوړ شوي دي[۳],[۸] . د دغو طبقو، په ځانګړې توګه د سیلیکان کارباید (SiC) طبقې اصلي دنده د انشقاق محصولاتو په نښه کول او د تودوخې او وړانګو پر وړاندې د میخانیکي ثبات ساتل دي [۸] ;[۳] . موندنې ښیي چې دا ذرات حتی تر ۱۶۰۰ سانتي ګراد درجې پورې په سخته حادثاتي شرایطو کې خپل جوړښت ساتي او د رادیو اکتیو موادو د خپریدو مخه نیسي [۸],[۵] .



۵ انځور. له غیر کروي والي پرته د تریزو ذرې محوري تناظر نبودنه [۳]

د تریزو ذرې د مجموعي ناکامۍ احتمال د محاسبه کولو لپاره له لاندې معادلې څخه استفاده کیږي چې د (SiC) د طبقې ثبات په مستقیم ډول د IPyC طبقې له درزونو سره تړي[۳].

د څېړنو په اساس، په تریزو ذراتو کې د SiC طبقې د ماتېدو ترټولو عام لامل دا دی چې لومړی په IPyC طبقه کې درز پیداکېدل دي. کله چې په داخلي طبقه کې درز رامنځته شي، نو د درز په ځای کې د سټرس مرکزیت پیدا کېږي چې په مستقیم ډول پر SiC طبقې فشار راوړي او هغه ماتوي. لاندینی معادله د تریزو ذرې د بشپړې ناکامۍ احتمال ښیي. یو تریزو ذره هغه وخت ناکامه ګڼل کېږي چې د هغې د سیلیکان کارباید(SiC) طبقه ماته شی، ځکه دا طبقه د رادیو اکتیو موادو د ساتلو اصلي خنډ دی.

$$P_f = P(SiC\ failure \mid IPyC\ faliure) \cdot P(IPyC\ failure) \qquad (٤)$$

په پورتنی معادله کې P_f د ناکامۍ ټولیز احتمال $P(SiC\ failure)$ د SiC طبقې د ماتېدو احتمال، $P(IPyC\ failure)$ د د داخلي PyC طبقې د ناکامېدو احتمال دی.

تریزو ذرات له یوه مرکزي هستې او مختلفو طبقو څخه جوړ شوي دي.د تودوخې د ټیټې درجې ایزوتروپیک تریزو یا (Low Temprature Isotropic) ذراتو د محافظتي طبقو پنډوالی په لاندې جدول کې ورکړل شوی دی.

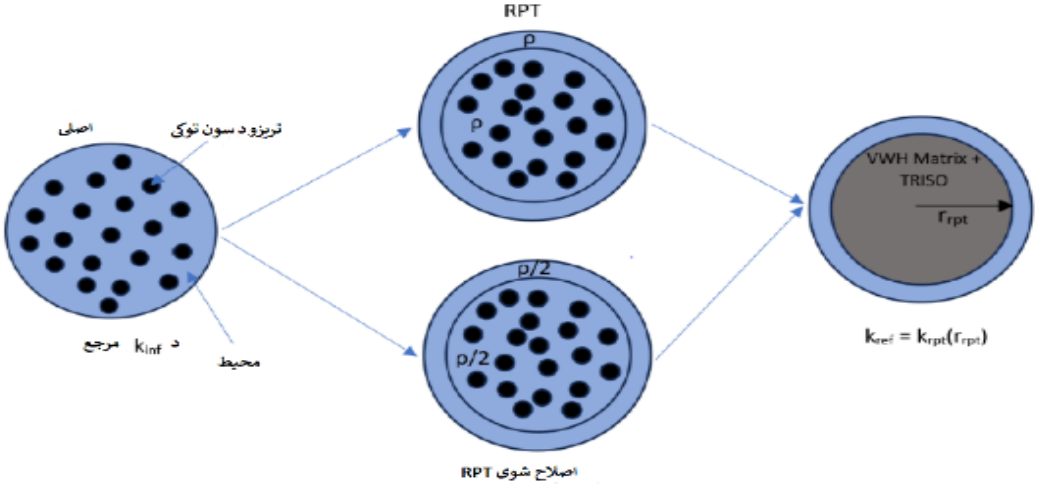
۳ جدول. د $(Th,U)O_2$ د (LTI TRISO) ذرې د ډیزاین معیاري ابعاد[۸]

بعدونه (μm)	د TRISO ذرو اجزاوې
۵۰۰	د مرکزي ذرې یا هستې قطر $(Th,U)O_2$
۹۰	د حایل طبقې پندوالی
٤۰	د iPyC طبقې پندوالی
۳۵	د SiC طبقې پندوالی
٤۰	د oPyC طبقې پندوالی

کله چې دا ذرات په (FCM) یا سون‌توکو کې د SiC ماتریس دننه ځای پر ځای کېږي، میخانیکي اعتبار یې نور هم زیاتېږي [۲] ;[۹] . ماتریس د تودوخې د هدایت لوړ ظرفیت لري، چې دا چاره د سون توکو د مرکز تودوخه د دودیزو اکسایدي سون‌توکو په پرتله په ښکاره ډول راښکته کوي او د سون‌توکو او پوښ ترمنځ میخانیکي تعاملات (PCMI) راکموي[٤] ;[۹] .

له محاسباتي اړخه، د دغو سون‌توکو دوه‌ګونی غیر متجانس والی (Double Heterogeneity) د نیوټرونیکي او حرارتي تحلیل لپاره یوه لویه ننګونه ده[۲] . څرنګه چې د تریزو ذراتو د ناکامۍ احتمال خورا کم ($۱۰^{-۳}$ څخه تر $۱۰^{-٦}$) دی، نو ځکه دودیز مونټي کارلو (Monte Carlo) شبیه سازی خورا ډېر وخت او لوړ لګښت ته اړتیا لري[۳] .

د موندنو له مخې، د دې ستونزې د حل لپاره له پرمختللو محاسباتي تخنیکونو لکه ماشین زده کړې (Machine Learning) او ډیپ نیورل شبکو (DNN) یا (Deep Neural Network)څخه ګټه اخیستل کېږي، چې د ۱- ډې او ۲- ډې فزیکي ماډلونو په ترکیب سره د سون‌توکو د اعتبار دقیقه او چټکه وړاندوینه کوي[۱۵] ,[۳] .



۶ انځور. د (RPT) یا (Reactivity Equivalent Physical Transformation) میتود د تطبیق شماتیک انځوراو د (TRISO) لپاره تعدیل شوی RPT میتود [۲]

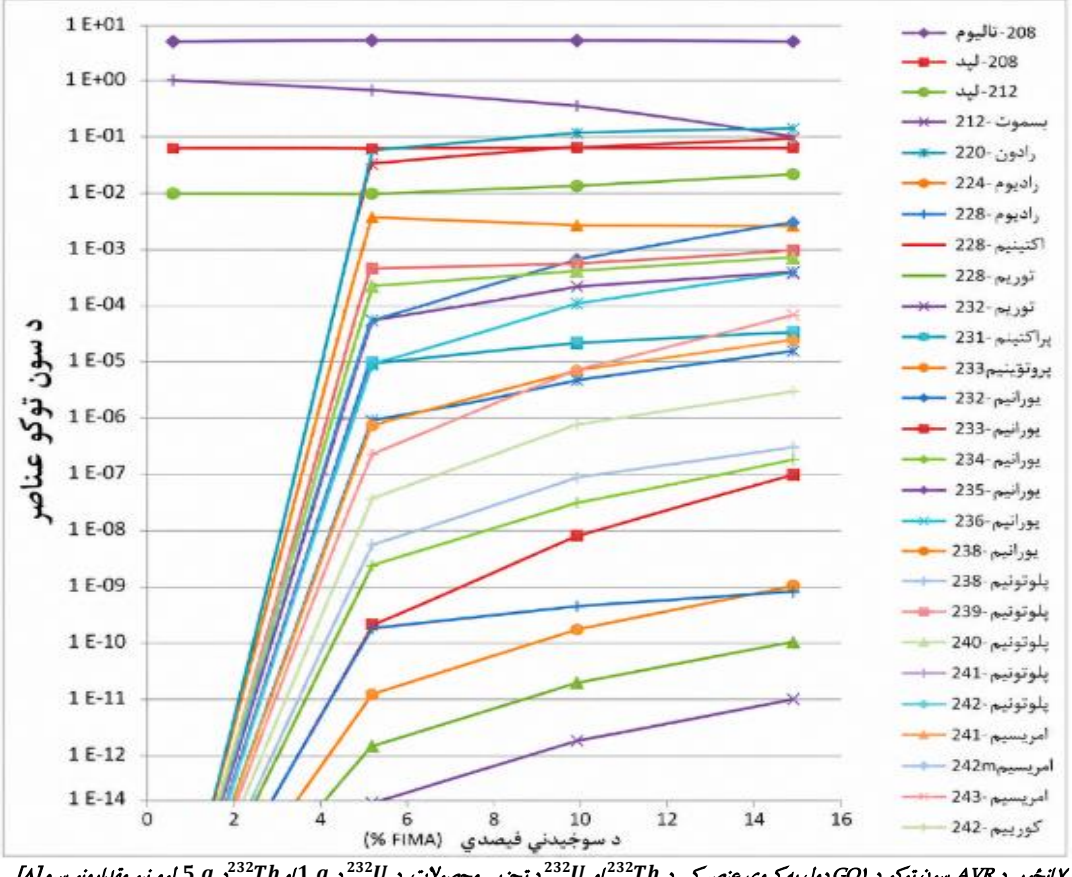
۵. د امنیت، نه خپرولو او هستوي خوندیتوب ارزونه

پرمختللي هستوي سون‌توکي او ریکټورونه نه یوازې د برېښنا تولید زیاتوي، بلکې د امنیتي ننګونو او د وسلو د خپراوي د مخنیوي لپاره هم نوي حل‌لارې وړاندې کوي.

۱ .د توریوم طبیعي غیر خپرېدل

توریوم د هستوي وسلو د جوړولو پر وړاندې یو پیاوړی طبیعي خنډ لري. موندنې ښیي چې د توریوم په دوران کې د یورانیم-۲۳۲ تولید د لوړې انرژۍ لرونکي ګاما وړانګو لکه(Tl-۲۰۸) د خپراوي لامل ګرځي، چې د دغو موادو پټول ناممکن کوي او د هغوی لرې کنټرول (Remote Handling) ته اړتیا رامنځته کوي([٤] ,[٨]) . برسېره پر دې، د U-۲۳۳ د خاصیت بدلولو (Denaturing) لپاره د U-۲۳۸ ور زیاتول کولای شي دا مواد د وسلو له کچې څخه د ریکتورر کچې ته راښکته کړي[٤] ;[٨] .

د سوځېدو پېښې په جریان کې د بېلابېلو رادیواکټیوموادو بیلابیل مقدارونه په لاس راځي د د یورانیم-۲۳۲ او تالیوم-۲۰۸ مقدار د وخت په تېرېدو سره زیاتېږي. په لاندې ګراف کې دغه بدلونونه په واضح ډول لیدل کېږي [٨],[١٤].



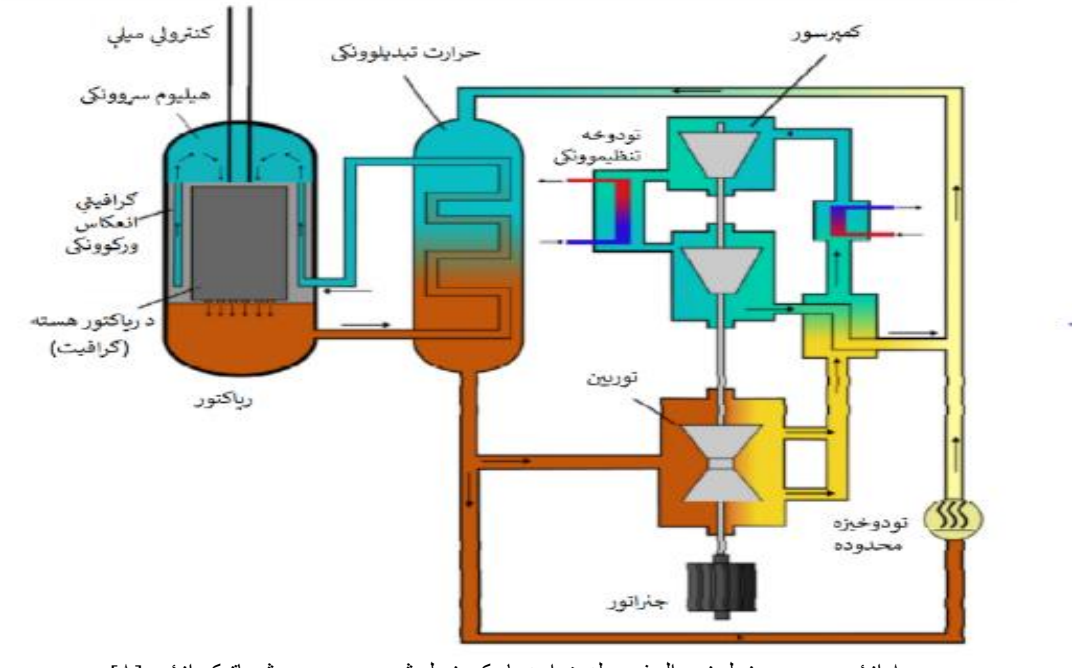
۷ انځور. د AVR سون توکو د GO1 ډول په کروي عنصر کې د ^{232}Th او ^{232}U د تجزیې محصولات د ^{232}U د 1 g او ^{232}Th د 5 g لومړنیو مقدارونو سره [۸]

۲ .د (FCM) او تریزو (TRISO) امنیتي ګټې

په (FCM) سون‌توکو کې د تریزو ذراتو ځای پر ځای کول په یو سیلیکان کارباید ماتریس کې، د پلوتونیم جلا کول او استخراج خورا ستونزمن او غیر اقتصادي کوي، چې دا چاره د ناوړه ګټې اخیستنې مخه نیسي[۹],[۲] . همدارنګه، تریزو ذرات د مایکرو کچې د څو طبقو لرلو له امله د انشقاق د محصولاتو په ساتلو کې خورا پیاوړي دي او حتی د فزیکي بریدونو یا سختو حادثو په صورت کې هم د رادیو اکټیو موادو د خپرېدو احتمال راکموي[۹] ;[۸] .

٤ جدول. د TRISO د سوخت ریاضیکي ارزیابی د $(Th,U)O_2$ له نوع څخه د(HEU) له عالي غني شوي یورانیم سره او د تودوخې د درجې سره د شبیه سازي د ازمایښت په ترڅ کې [۸]

د HEU ذرو سره د $(ThU)O_2$ تریزو ذرو سره کروي عناصر	د سون ټوکو د بدنونو شمیر	د پوښل شوو ذرو شمیر N	د راکتور دننه د خراب شوو ذرو شمیر n	د متوقعه ناکامي نسبت n/N	له 95% څخه بورته د یو اړخیز باور حد
R2-K13/1 د ټومرنیو 550 h په جریان کې	1	20 050	0	0	
XV* د AVR GO2 له بیابارولو څخه	4	41 920	0	0	
مجموعه	5	61 970	0	0	4.8×10^{-5}



۸ انځور . د IV نسل نړیوال فورم له خوا په پام کې نیول شوي د VHTR شیماتیک انځور[۸]

په ټوله کې ویلی شو چې پرمختللي هستوي سونټوکي لکه د توریوم پر بنسټ سونټوکي، (TRISO) او(FCM) د دودیزو یورانیمي سونټوکو په پرتله غوره حرارتي، میخانیکي او نیوترونیکي ځانګړتیاوې لري. توریوم دای اکساید د لوړ ویلې کېدو ټکي او ښه حرارتي هدایت له امله د ریکتور خوندیتوب زیاتوي او د مرکز د تودوخې خطر راکموي. پرمختللي محافظتي پوښونه لکهد حادثې ضد سون توکي او (FeCrAl) الیاژونه د لوړې تودوخې او بخار پر وړاندې لوړ مقاومت لري او د هایدروجن تولید کموي. همدارنګه، (TRISO) او (FCM) سونټوکي د څو محافظتي طبقو له امله د رادیو اکټیف موادو د خپرېدو مخه نیسي او د هستوي وسلو د خپراوي پر وړاندې قوي امنیتي خنډونه رامنځته کوي.

مناقشه

دبرېښنا د تولید هغه سرچینې چې کاربن نه تولیدوي دبرېښنا د تولیدد ټولو سرچینو (۷۳٪) برخه جوړوي خو د اوسنیو ریکټورونو ترټولو لویه ننګونه د یورانیم دای اکساید (UO_2) محدود حرارتي او میخانیکي ځانګړتیاوې دي. کله چې دغه سونټوکي د سختو وړانګو او لوړې تودوخې سره مخ کېږي، په کریستالي شبکه کې یې نیمګړتیاوې رامنځته کېږي چې د فونونونو د خپرېدو سبب ګرځي او په پایله کې یې د حرارتي هدایت وړتیا تر ۷۰ سلنې پورې راکمېږي. دغه کموالی په مرکز کې د تودوخې د خطرناک زیاتوالي او د سونټوکو د ویلې کېدو احتمال زیاتوي.

د دې ستونزې د حل لپاره، توریوم (ThO_2) د یو غوره بدیل په توګه مطرح دی؛ ځکه دا مواد د یورانیم په پرتله لوړ حرارتي هادیت او د ویلې کېدو خورا لوړ ټکی ($3390^\circ C$) لري چې ریکتور ته پراخ حرارتي خوندیتوب برابروي. سربېره پر دې، توریوم د نسل تولید وړتیا لري او په ریکټورونو کې د $U-233$د تولید سبب ګرځي. له چاپېریالي او امنیتي پلوه هم د توریوم دوره د پام وړ ګټې لري، ځکه د یورانیم په پرتله تر لس چنده لږ درانه اکتنایدونه تولیدوي او په ترکیب کې یې د$U-232$ شتون (چې پیاوړې ګاما وړانګې لري) د هستوي وسلو د جوړولو پر وړاندې یو قوي طبیعي امنیتي خنډ رامنځته کوي.

د ریکټور د خوندیتوب په برخه کې، د حادثو ضد محافظتي پوښونو رول حیاتي دی ځېرنې ښیي چې د زیرکونیم پر ځای دحادثې ضد سون توکو کارول د اکسدیشن سرعت ۲۵ ځله راکموي، او د سیلیکان کارباید (SiC) ترکیبات حتی تر ۱۷۰۰ درجو پورې خپل ساختماني ثبات ساتي او د هایدروجن چاودېدونکی تولید نږدې صفر کوي. همدارنګه، د تریزو پرمختللي سونټوکي د خپلو ځلورو مایکرو محافظتي طبقو په لرلو سره حتی په خورا سختو حرارتي شرایطو کې هم د رادیو اکټیو موادو د خوندي ساتنې توان لري.

۵ جدول. د UO_2 ، ThO_2او TRISO سون‌توکو د مهمو پارامترونو له مخې د پرتله کولو جدول[۲],[۳],[٤],[٥],[٦].

پارامتر	یورانیم دای اکساید	توریم دای اکساید	تریزو سون توکي
د ویلی کید ټکی	شاوخوا $2865^{\circ}C$	شاوخوا $3390^{\circ}C$	خورا لوړ حرارتی مقاومت؛ د CiS طبقې خرابوالی تر $2100^{\circ}C$ پورته تودوخه کې پیلېږي.
حرارتی هادیت	ټیټ؛ د وړانګو له امله د رامنځته شویو نیمګړتیاوو په وجه تر ٪۷۰ پورې راکمېږي.	د UO_2 په پرتله په پام وړ ډول لوړ دی	په ماتریس (ګرافیت یا SiC) پورې اړه لري؛ خو په ټوله کې مطلوب حرارتي لېږد لري
د اکتنایدونو تولید	لوړ (په ځانګړي ډول پلوټونیم او کوچني اکتنایدونه)	د یورانیم د دورې په پرتله لږترلږه لس چنده کم دی	که د توریوم هسته وکارول یش، د کثافاتو اکتنایدونه یې خورا لږ دي
په حادثه کې ثبات	محدود؛ په لوړه تودوخه کې له بخار رسه تعامل کوي او چاودېدونکی هایدروجن تولیدوي	خورا لوړ؛ د کیمیاوي ثبات او لوړ ویلې کېدو ټکي له امله د خوندیتوب حاشیه زیاتوي	عالي؛ ځلور محافظتي طبقې حتی $3390^{\circ}C$ په تودوخه کې هم انشقاقي محصوالت په ځان کې ساتي
په نړیوال بازار کې شتون	ډېر لوړ	محدود	ډېر محدود

په دې ډول مو لاندی پایلو ته لار موندلی شو:

- له پورتنیو سون توکو څخه یورانیم دای‌اکساید (UO_2) په نړیوال بازار کې تر ټولو ډېر کارېدونکی او غالب سون توکی دی او په اسانۍ سره ترلاسه کېدای شي. له همدې امله، دا د سپکو اوبو ریکتورونو (Light Water Reactors) لپاره تر ټولو مناسب سون توکی ګڼل کېږي.

- توریوم دای‌اکساید د خپل لوړ حرارتي هدایت او د احتمالي پېښو پر مهال د ښه ثبات له امله، د فشاري اوبو ریکټورونو لپاره مناسب سون توکی ګڼل کېږي.

- تریزو سون‌توکي د لوړې تودوخې ګازي ریکټورونو(HTGRs) ، کوچنیو ماډلر ریکټورونو (SMRs) او د ویلې شوې مالګې په واسطه سرېدونکو ریکټورونو (MSRs) لپاره مناسب سون توکي ګڼل کېږي. دا ځکه چې تریزو سون‌توکي په کوچنیو ماډلر ریکټورونو کې د یخولو د سیستم د بشپړې ناکامۍ پر مهال هم د رادیواکتیفو فیشن(انشقاق) محصولاتو د خپرېدو مخه نیسي او د کوچنیو او مایکرو ریکټورونو د اوږدمهاله او خوندي فعالیت ډاډ ورکوي.

پایله

ویلی شو چې د توریوم سون‌توکو، پرمختللو محافظتي پوښونو او تریزو ذراتوګډ کارول هستوي انرژي په یوه خوندي، پایښت لرونکې او اغېزناکې انرژۍ بدلولی شي. دغه پرمختللي مواد نه یوازې د ریکتورونو حرارتي او امنیتي ننګونې حل کوي، بلکې د اقلیمي بدلون په مدیریت او د انرژۍ د نړیوال بحران په پای ته رسولو کې هم بنسټیز رول لوبولی شي .

سره له دې چې د دغو نویو موادو محاسباتي تحلیل لکه غیر متجانس جوړښت پیچلی دی، خو د ماشین زده کړې (Machine Learning) کارولو دغه ستونزې په دقیق او چټک ډول حل کړې دي. له همدې امله،په افغانستان کې د هستوي فزیک او اتومي انرژۍ په برخه کې پر کوچنیو ماډلر ریکټورونو (SMRs) پانګونه وشي، ترڅو هېواد وکولی شي د پاکې او خوندي انرژۍ له دغې مهمې سرچینې څخه د خپل ملي پرمختګ لپاره اغېزمنه ګټه واخلي.

د هستوي ریکټورونو د خوندیتوب د اعظمي کولو لپاره، وړاندیز کېږي چې د توریوم (ThO_2) سون‌توکو، د سیلیکان کاربایډ (SiC) پرمختللو پوښونو او د تریزو ذراتو د ګډ چلند په اړه لا ډېر تحلیلي او ملټي فزیک (Multi-physics) تحقیقات ترسره شي. دا ډول څېړنې به مرسته وکړي چې په خورا سخته حادثایي شرایطو کې د نویو هستوي سیستمونو ثبات او اعتبار په بشپړ ډول تصدیق شي. تر دې ور هاخوا د د هېواد دننه په کوچنیو تحقیقاتی ریاکتورونو پانګه اچونه وشی او پرمختللو هیوادونو څخه دې ورته متخصص او په کار پوه خلک راوبلل شي.

ماخذونه

١. C. L. Beck *et al.*, "Behavior from nuclear fuel dissolution to environmental release," *RSC Advances*, vol. ١٤, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠٣٩/D٤RA٠٦٤٩٤A.

٢. K. S. Chaudri *et al.*, "Review of neutron physics analyses for accident-tolerant fuel system," *Engineered Science*, ٢٠٢٤, doi: ١٠,٣٠٩١٩/es١١٢٦.

٣. S. L. N. Dhulipala *et al.*, "Reliability estimation of an advanced nuclear fuel using coupled active learning, multifidelity modeling, and subset simulation," *arXiv*, Jan. ٢٠٢٢. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/٢٢٠١,٠٢١٧٢

٤. M. H. du Toit *et al.*, "Review of thorium-containing fuels in LWRs," *Progress in Nuclear Energy*, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠١٦/j.pnucene.٢٠٢٤,١٠٥١٣٦.

٥. M. Fang and A. Di Fulvio, "Multi-mode imaging for TRISO-fueled pebble identification," *arXiv*, Apr. ٢٠٢٢. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/٢٢٠٤,١٣٧٧٤

٦. D. H. Hurley *et al.*, "Thermal energy transport in oxide nuclear fuel," *Chemical Reviews*, vol. ١٢١, no. ٥, pp. ٢٩٠١–٢٩٥٨, ٢٠٢١, doi: ١٠,١٠٢١/acs.chemrev.١c٠٠٢٦٢.

٧. "Integration of computer vision and machine learning for quality control of TRISO nuclear fuel manufacturing," *arXiv*, Mar. ٢٠٢٤. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/٢٤٠٣,١٨٨٤٩

٨. International Atomic Energy Agency, "*Performance Analysis Review of Thorium TRISO Coated Particles During Manufacture, Irradiation and Accident Condition Heating Tests*," IAEA-TECDOC-١٧٦١, Vienna, Austria, ٢٠١٥

٩. Y. Li *et al.*, "Developments, challenges and prospects in thermal-hydraulic research on accident tolerant fuel," *Heliyon*, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠١٦/j.heliyon.٢٠٢٤.e٣٨٩٩٩.

١٠. L. May and M. Werz, "A state-of-the-art review on nuclear reactor concepts and associated advanced manufacturing techniques," *Energies*, vol. ١٨, no. ١٦, ٢٠٢٥, doi: ١٠,٣٣٩٠/en١٨١٦٤٣٥٩.

١١. R. B. Rebak, "Improved and innovative accident-tolerant nuclear fuel materials considered for retrofitting light water reactors—A review," *Corrosion and Materials Degradation*, vol. ٤, no. ٣, ٢٠٢٣, doi: ١٠,٣٣٩٠/cmd٤٠٣٠٠٢٤.

١٢. D. Rochman *et al.*, "An introduction to spent nuclear fuel decay heat for light water reactors: A review from the NEA WPNCS," *EPJ Nuclear Science and Technology*, vol. ١٠, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠٥١/epjn/٢٠٢٤٠٠١.

١٣. H. M. Wainwright *et al.*, "Cross-disciplinary reactor-to-repository framework for evaluating spent nuclear fuel from advanced reactors," *arXiv*, May ٢٠٢٤. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/٢٤٠٥,١٢٨٠٥

١٤. P. Wang and M. Bachhav, "Editorial: Nuclear material for current and future reactor design," *Frontiers in Nuclear Engineering*, vol. ٣, ٢٠٢٤, doi: ١٠,٣٣٨٩/fnuen.٢٠٢٤,١٣٩٢٧٤٢.

١٥. F. Xu *et al.*, "Advanced characterization-informed framework and quantitative insight to irradiated annular U-١٠Zr metallic fuels," *arXiv*, Oct. ٢٠٢٢. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/٢٢١٠,٠٩١٠٤

بیوګرافیمولفین

۱.نامزد پوهنیار نورالله فیض الباري د کابل پولی‌تخنیک پوهنتون د فزیک ډیپارټمنټ استاد دی. نوموړي د لیسانس تر کچې تحصیلي زده کړې ترسره کړې دي او د تدریس او علمي فعالیتونو په برخه کې د فزیک له علمي څانګې سره تړاو لري.د نوموړي د علمي او څېړنیزو علاقو اساسي ساحه اتومي او هستوي فزیک ده.

۲.پوهاند احسان الله ثاقب د ننګرهار پوهنتون د ښوونې او روزنې پوهنځي د فزیک څانګې استاد دی. نوموړي د ماسټرۍ تر کچې تحصیلي زده کړې ترسره کړې دي او د علمي او تدریسي فعالیتونو په برخه کې د فزیک له علمي څانګې سره تړاو لري.د نوموړي د علمي څېړنو او مطالعاتو اساسي حوزه اتومي او هستوي فزیک ده.

۳.پوهاند محمد داؤد احمدزی د کابل پولی‌تخنیک پوهنتون د الکترومېخانیک پوهنځي د فزیک څانګې استاد دی. نوموړي د ماسټرۍ تر کچې تحصیلي زده کړې ترسره کړې دي او د فزیک په برخه کې په تدریسي او علمي فعالیتونو بوخت دی. د نوموړي د علمي څېړنو او مطالعاتو اساسي حوزه میخانیک فزیک ده