

آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER-1000 در طول حادثه از دست رفتن

خنک کننده با استفاده از کد FRAPTRAN

معصومه دهقانی زاده^۱، محسن خردمند سعدی^{۱*}، غلامرضا جهان فرنی^۱

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی هسته ای، تهران-ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۸

چکیده

ارزیابی عملکرد سوخت در شرایط حادثه یک چالش مهم در آنالیز ایمنی به شمار می رود. بدین منظور، کدهای محاسباتی متعددی مختص بررسی عملکرد میله سوخت توسعه یافته اند. این کدها به بررسی پدیده های حاکم بر رفتار میله سوخت در حین حادثه شامل تغییر فاز غلاف، اکسید شدن زیرکونیوم، تغییر شکل خزشی و شکست آلیاژ غلاف می پردازند. هدف پژوهش حاضر، بررسی عملکرد میله سوخت راکتور VVER-1000 در حین حادثه از دست رفتن خنک کننده مدار اول با استفاده از مجموعه کدهای FRAPCON-4.0 و FRAPTRAN-1.5 می باشد. نمونه مورد بررسی میله سوخت راکتور VVER-1000 در آزمایش IFA-650.6 است. مقایسه نتایج بدست آمده با دیگر نتایج تئوری و تجربی منتشر شده، مؤید اعتبار کد در آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت VVER می باشد. علاوه بر این، نتایج شبیه سازی صورت گرفته نشان داد که علاوه بر معیارهای ایمنی فعلی در طراحی سیستم های ایمنی حادثه LOCA لازم است شکست غلاف نیز به عنوان دیگر معیار ایمنی در نظر گرفته شود. این موضوع هم اکنون توسط کمیسیون نظام ایمنی آلمان (RSK) در تحلیل حادثه LOCA اعمال می گردد.

واژه های کلیدی: عملکرد میله سوخت، آنالیز ترمومکانیکی، کد FRAPCON، کد FRAPTRAN

۱- مقدمه

راکتورهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی انجام می گیرد و متناسب با آن، مدل های محاسباتی نیز به روز می گردند. در ابزارهای تحلیلی برای پیش بینی رفتار سوخت در شرایط حادثه معیارهای تجربی وجود دارد که بر مبنای آن زمانی که میله سوخت آن قدر ضعیف می شود تا به نقطه شکست (Burst) برسند را تعیین می کند (Gomes et.al, 2015).

حادثه از دست رفتن خنک کننده مدار اول (LOCA) در زمره مهمترین حوادث مبنای طرح در

عموماً میله سوخت به عنوان اولین سد در برابر نشت مواد رادیواکتیو در نظر گرفته می شود. با این وجود در زمان وقوع حادثه، امکان آسیب به میله سوخت در اثر دماهای بالا و نیز وجود اختلاف فشار زیاد در طرفین غلاف سوخت، وجود دارد. مشخصات شکست وابسته به پدیده های مختلف فیزیکی است، که در قالب مدل های مختلف در کدهای محاسباتی لحاظ می گردند. آزمایش های بسیاری به طور پیوسته روی مواد مختلف و شرایط متفاوت بهره برداری در

نکته سبب شده تا برخی از واحدهای قانونی علاوه بر الزامات فوق، الزامات دیگری در خصوص شکست غلاف را برای حادثه LOCA در نظر بگیرند. به عنوان مثال کمیسیون نظام ایمنی آلمان RSK، الزام می‌دارد تا تعداد کل میله‌های سوخت آسیب دیده طی حادثه LOCA از ۱۰٪ میله‌های بارگذاری شده تجاوز نکند. بنابراین آنالیز ایمنی حادثه LOCA بایستی شامل مدلی برای پیش‌بینی میزان باد کردگی و ترکیدن میله سوخت با توجه به دمای غلاف و اختلاف فشار بین داخل و خارج غلاف به صورت تابعی از زمان باشد (Massih and Jernkvist, 2015; Manngård et.al, 2011). رفتار غلاف در طول حادثه تحت کنترل تغییر فاز غلاف، اکسید شدن زیرکونیوم، تغییر شکل خزشی و شکست آلیاژ زیرکونیوم بوده که همگی در عرض چند دقیقه رخ می‌دهند. در این پژوهش، عملکرد میله سوخت راکتور VVER در آزمایش IFA650.6 با استفاده از کد FRAPTRAN-1.5 (Geelhood et.al, 2014) مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش مدل‌سازی

میله سوخت آزمایش IFA-650.6 از یک راکتور VVER-1000 به نام لویزا^۱ که در کشور فنلاند واقع است انتخاب شده است. این میله برای چهار سیکل تحت تابش قرار گرفته و میزان مصرف سوخت این میله به 55.5 GWd/MTU رسیده است. بعد از این مرحله و بازسازی سوخت، میله سوخت در معرض حادثه LOCA در راکتور هالدن^۲ قرار می‌گیرد (Geelhood et.al, 2016). روش کلی آزمایش IFA-650.6 به این صورت است که، پیش از انجام آزمایش LOCA، توان راکتور تا رسیدن به یک سطح معین در میله‌ی سوخت تنظیم شده، سپس گرمکن با توان ثابت روشن می‌گردد. در فاز آماده سازی، راکتور (در اثر چرخش اجباری) با استفاده از مدار جریان خارجی کار می‌کند. پس از رسیدن به توان دلخواه سوخت،

راکتورهای آب سبک است که فرکانس رخداد آن قابل توجه است. توالی رویدادها در چند دقیقه اولیه پس از شروع حادثه به سه فاز تقسیم می‌گردد: الف) فاز Blowdown که در آن خنک کننده با شدت فراوان از محفظه راکتور به بیرون می‌ریزد. ب) فاز Refill که طی آن سیستم خنک کننده اضطراری قلب (ECCS) شروع به پُر کردن محفظه فشار تا زیر قلب راکتور می‌کند. ج) فاز Reflood که طی آن سطح آب به حد کافی بالا می‌رود تا قلب را خنک کند. فاز Blowdown در حدود ۲۰ ثانیه طول می‌کشد و طی آن دمای غلاف تا حدود ۱۲۵۰ درجه کلوین بالا می‌رود. فاز Refill از زمان تزریق آب بور دار شروع شده و حدود ۱۰ تا ۱۵ ثانیه طول می‌کشد با این وجود به علت انتقال حرارت ضعیف بین میله سوخت و مخلوط آب و بخار موجود در قلب، دمای غلاف همچنان به افزایش خود ادامه می‌دهد و به حدود ۱۳۰۰ درجه کلوین می‌رسد. فاز Reflood از زمانیکه سطح آب به کف میله‌های سوخت می‌رسد شروع شده و پس از دوره‌ای در حدود ۶۰ ثانیه دمای غلاف، رو به کاهش می‌گذارد. تاکنون معیارهای پذیرش حادثه LOCA در طراحی سیستم ECCS به موارد زیر محدود بوده است: الف) ماکزیمم دمای غلاف از ۱۴۷۷ درجه کلوین تجاوز نکند. ب) کسر اکسید شدگی غلاف از ۱۷٪ ضخامت غلاف تجاوز نکند. ج) مدل‌هایی به منظور برهمکنش‌های بین بخار و فلز آلیاژ زیرکونیوم در نظر گرفته شود.

بهر حال در این حادثه، از دست رفتن قدرت خنک‌کنندگی در کنار افت فشار شدید، تنش بسیار بزرگی بر میله‌های سوخت اعمال می‌کند. این شرایط می‌تواند منجر به انبساط به سمت خارج غلاف (بادکردگی) بر اثر مکانیزم‌های خزش شده و نهایتاً منجر به شکست غلاف گردد. همچنین باد کردن غلاف سطح مقطع زیرکانال برای عبور سیال آب را کاهش داده و باعث بسته شدن مسیر جریان در فازهای Refill و Reflood می‌شود (Massih and Jernkvist, 2015). توجه به این

سرعت افت می کند (Massih and Jernkvist, 2015). مشخصات و شرایط کلی میله ی UO_2 که در آزمایش IFA-650 مورد استفاده قرار گرفته، در جدول (۱) داده شده است. ابعاد میله سوخت و تاریخچه توان از اطلاعات میله سوخت اولیه بدست آمده است.

تجهیزات آزمایش از مدار خارجی جدا شده و اجازه داده می شود تا دماها در اثر چرخش طبیعی برای چند دقیقه پیش از وقوع حادثه ی LOCA، پایدار شوند. فاز Blowdown از طریق باز کردن شیرها به تانک تخلیه آغاز می شود. در این فاز فشار خنک کننده به

جدول ۱- داده های میله سوخت در آزمایش IFA 650.6 (Manngård and Stengård, 2016)

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
0.111	ضخامت گپ (mm)	7.55	قطر قرص سوخت (mm)
UO_2	جنس سوخت	1.484	قطر سوراخ داخلی پلت (mm)
E110 (Zr-1%Nb)	جنس غلاف	10	طول پلت سوخت (mm)
95% آرگون - 5% هلیوم	گاز داخل میله	480	طول میله سوخت (mm)
3.0	فشار داخل (MPa)	9.13	قطر خارجی غلاف (mm)
55.5	میزان مصرف سوخت (MWd/kgU)	0.679	ضخامت غلاف (mm)

پایگاه داده کد FRAPTRAN موجود است. همان طور که ذکر شد، هندسه خنک کننده برای این آزمایش یک شرایط حادثه LOCA نوعی می باشد که شامل یک میله سوخت داخل یک لوله داغ است. برای شروع آزمایش آب از داخل این لوله تخلیه می شود، و در نهایت اسپری فعال شده و راکتور خاموش می گردد و آزمایش به پایان می رسد. ورودی کد FRAPTRAN به گونه ای تنظیم شده است که مقادیر دمای سطح غلاف اندازه گیری شده را به عنوان شرایط مرزی به کار ببرد. تاریخچه دمای سطح غلاف برای دو نقطه محوری موجود است. برای مدل کردن شرایط خنک کننده، میله به دو ناحیه تقسیم شده و تاریخچه دمایی برای هر کدام از ارتفاع های محوری برابر با دمای خنک کننده در همان ناحیه محوری در نظر گرفته شده است. به منظور ارضای این حالت که دمای خنک کننده و دمای سطح غلاف یکسان شود، ضریب انتقال حرارت بین غلاف و خنک کننده، بزرگ

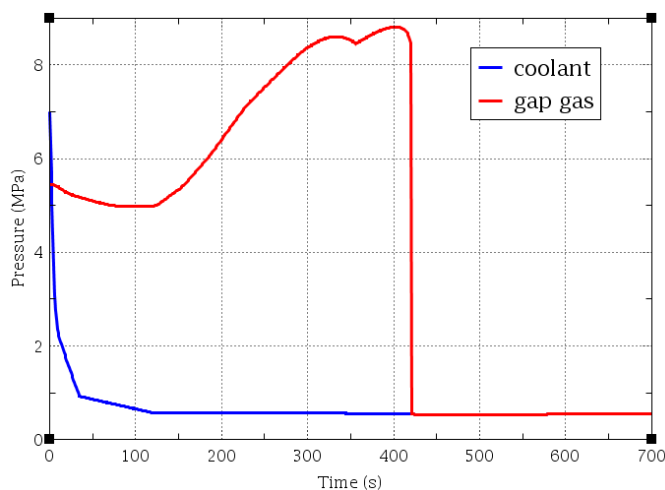
غلاف مورد استفاده در راکتورهای VVER-1000 آلیاژی شامل زیرکونیوم و ۱٪ نئوبیوم است که نام تجاری آن EH-110 می باشد. در کد FRAPCON-4.0 (Geelhood et.al. 2015) خصوصیات این غلاف وجود ندارد، بنابراین برای دوره زمانی پرتو دهی اولیه ماده M5 در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی این ماده با EH-110 یکسان می باشد. پروفایل توان محوری به صورت یکنواخت فرض شده است. براساس داده های فوق کد FRAPCON-4.0 اجرا شده و فایل آغازین کد FRAPTRAN ایجاد می گردد. در مرحله ساخت مجدد میله سوخت جهت بارگذاری در راکتور هالدن، پاره های شکافت گازی تولید شده در مرحله پرتو دهی تخلیه شده و دوباره میله سوخت با فشار ۳۰ بار از آرگون و هیدوژن پر می شود. بنابراین در فایل آغازین FRAPTRAN، مقادیر گازهای موجود در میله به صورت دستی اصلاح گردید. برخلاف کد FRAPCON-4.0، خصوصیات غلاف EH-110 در

انتخاب شده است.

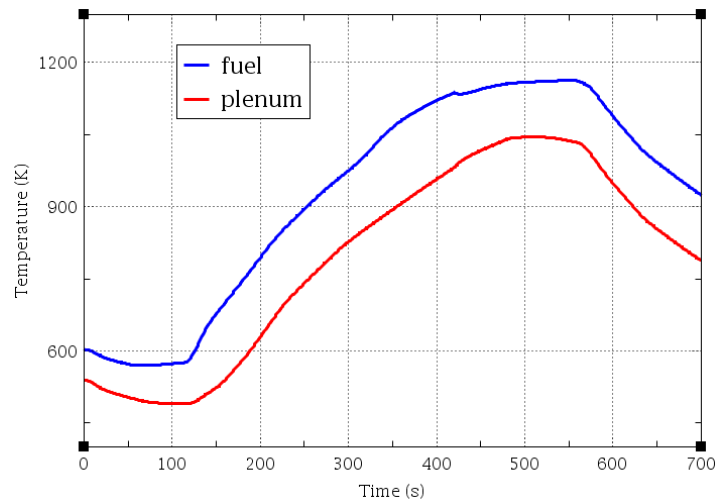
موجود در پلنوم نشان داده شده است. همچنین شکل (۳) بیانگر تغییرات دمای سطح غلاف (در ارتفاعهای مختلف) می‌باشد. در این شکل‌ها زمان شروع گرم شدن (ثانیه ۱۲۰) و زمان خاموش‌سازی (ثانیه ۵۶۰) کاملاً مشخص است. همانگونه که از شکل (۳) نتیجه گرفته می‌شود، در حادثه LOCA اعمال شده، دمای سطح غلاف از معیار ۱۴۷۷ درجه کلوین تجاوز نمی‌کند. با این وجود در طول حادثه غلاف به نقطه شکست خود رسیده است. بنابراین لازم است در آنالیز حادثه LOCA، معیار شکست غلاف نیز در کنار سایر معیارها در نظر گرفته شود.

۳- نتایج مدل‌سازی

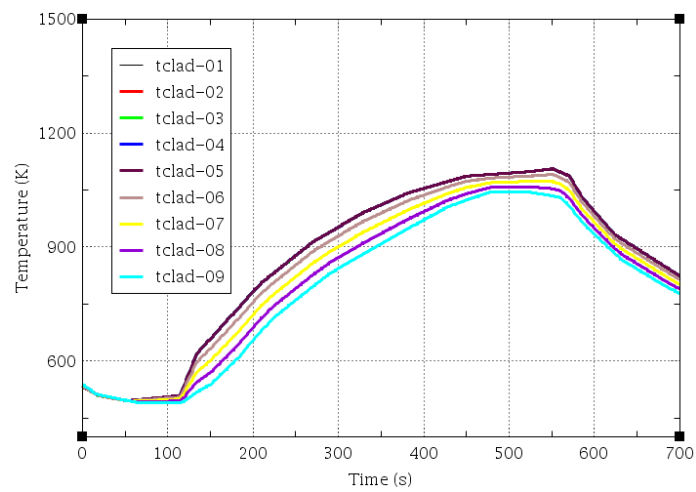
در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش با استفاده از کد FRAPCON/FRAPTRAN ارائه شده و با دیگر نتایج منتشر شده مقایسه شده است. شکل (۱) تغییرات فشار خنک‌کننده و فشار گاز داخل میله سوخت را با گذشت زمان نشان می‌دهد. چنانچه از شکل مشخص است، فشار داخل میله تا فشار ۸/۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد تا این‌که پس از ۴۲۰ ثانیه به نقطه شکست می‌رسد. در این زمان فشار داخل سریعاً کاهش یافته و به فشار سیستم می‌رسد. در شکل (۲) تغییرات دمای متوسط سوخت و گاز



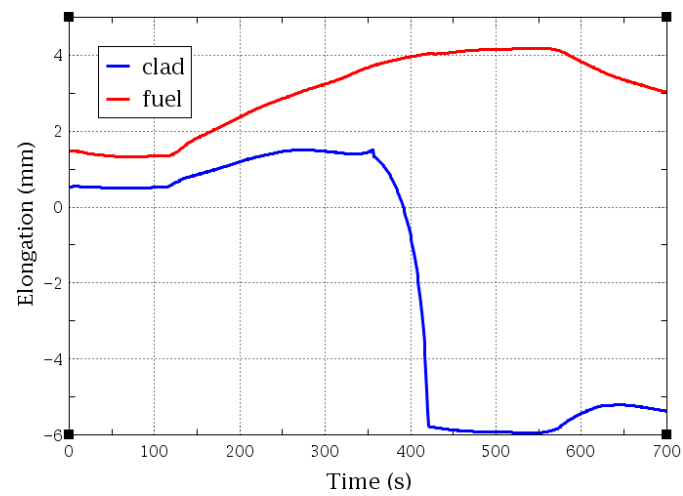
شکل ۱- تغییرات فشار در خنک‌کننده و گاز داخل میله سوخت



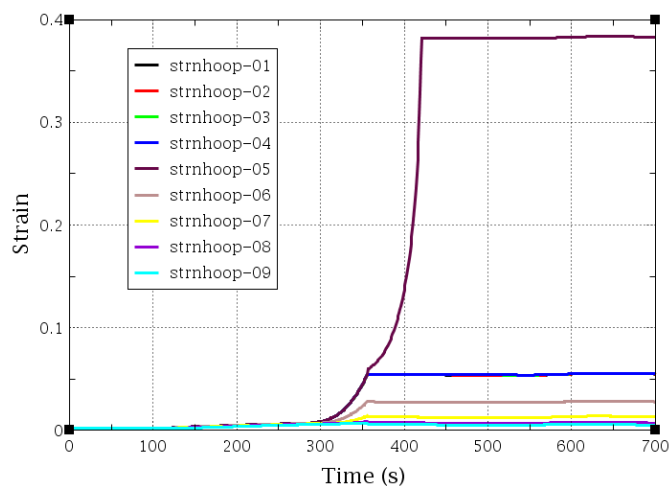
شکل ۲- تغییرات دمای متوسط سوخت و گاز پلنوم



شکل ۳- تغییرات دمای غلاف در ارتفاع‌های مختلف



شکل ۴- تغییر طول غلاف و سوخت



شکل ۵- کرنش هوب غلاف در ارتفاع‌های مختلف

میله را نمی‌توان در طول آزمایش به صورت تجربی بدست آورد، اما به محض شکست غلاف، فشار سریعاً تا سطح فشار سیستم کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نتایج مدل‌سازی انجام شده با نتایج کد FRAPTRAN-2.0 بسیار نزدیک است که با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌های تجربی و تقریب‌های مدل‌سازی قابل قبول می‌باشد.

در شکل (۴) تغییر طول غلاف و سوخت و در شکل (۵) میزان کرنش هوب غلاف در ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. در این دو شکل نقطه شکست غلاف پس از ۴۲۰ ثانیه بوضوح مشخص است. پارامترهای کلیدی محاسبه شده و مقایسه آن با سایر نتایج منتشر شده در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار مطلق سطح فشار داخل

جدول ۲- مقایسه نتایج محاسبات با سایر نتایج منتشر شده

FRAPTRAN-QT1.4c *	FRAPTRAN-GENFLOW*	FRAPTRAN2.0 **	تجربی *	محاسبات FRAPTRAN1.5	پارامتر
455	530	419	525	420	زمان شکست (S)
4.1	4.2	8.8	6.4	8.8	فشار قبل از شکست (MPa)
840	853	-	830	794	دمای غلاف قبل از شکست (°C)
89	72	36	36	36	ماکزیمم افزایش قطر غلاف
3.5	1.5	1.2	2.0	1.2	افزایش ضخامت لایه اکسید

* Manngård and Stengård, 2016

** Geelhood *et.al*, 2016

Ali R. Massih, Lars Olof Jernkvist, "Assessment of data and criteria for cladding burst in loss-of-coolant accidents", Quantum Technologies, SSM 2015:46, 2015

Tero Manngård, Lars Olof Jernkvist, Ali R. Massih, " Evaluation of loss of coolant accident simulation tests with the fuel rod analysis code FRAPTRAN-1.4", Quantum Technologies AB, Report TR11-008V1, 2011

[4] K. J. Geelhood, W.G. Luscher, and J. M. Cuta, "FRAPTRAN-1.5: A computer code for the transient analysis of oxide fuel rods", Technical Report PNNL-19400, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, May 2014.

K. J. Geelhood, W.G. Luscher, and J. M. Cuta, "FRAPTRAN-2.0: Integral assessment", Technical Report PNNL-19400, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, May 2016.

Geelhood, K. J., W. G. Luscher, P.A. Raynaud, I.E. Porter, "FRAPCON-4.0: A computer code for the calculation of steady-state thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup", PNNL-19418, Vol.1 Rev.2, 2015.

Tero Manngård, Jan-Olof Stengård, "Evaluation of the Halden IFA-650 loss-of-coolant accident experiments 5, 6 and 7", Quantum Technologies, SSM 2014:19, 2014.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER-1000 در آزمایش IFA 650.6 با استفاده از مجموع کدهای FRAPCON-4.0 و FRAPTRAN-1.5 انجام گرفت. برخی از پارامترهای کلیدی ارائه شده و با دیگر نتایج منتشر شده مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد که کد FRAPTRAN-1.5 موجود معتبر بوده و قابلیت مدل‌سازی و تحلیل ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER در آن وجود دارد. از طرف دیگر نتایج آزمایش و شبیه‌سازی نشان داد که در حادثه LOCA علاوه بر معیارهایی که تاکنون مورد استفاده قرار می‌گرفت، لازم است معیاری جهت شکست غلاف نیز در نظر گرفته شود موضوعی که هم اکنون توسط واحد قانونی نظام ایمنی آلمان لحاظ می‌گردد.

پی نوشت ها

¹ Loviissa

² Halden

مراجع

Daniel de Souza Gomes, Antonio Teixeira Silva, Alfredo Abe, Claudia Giovedi and Marcelo Ramos Martins, "Simulation of The Effects of the Extend Fuel Rod Burn-Up under LOCA Scenario", International Nuclear Atlantic Conference, São Paulo, SP, Brazil, October 4-9, 2015.



Thermo-Mechanical Analysis of VVER-1000 Fuel Rods during Loss of Coolant Accident using FRAPTRAN code

M. Dehghanizadeh¹, M. Kheradmand Saadi*¹, Gh. Jahanfarnia¹

¹Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 20 - 1 - 2019

Accepted: 9 - 12 - 2019

Abstract

Evaluating fuel performance in the event of an accident is an important challenge in safety analysis. To this end, several computational codes have been developed to evaluate the performance of the developed fuel rod. These codes examine the phenomena that governing the behaviour of the fuel rod during an accident include sheath phase alteration, zirconium oxidation, creep deformation, and sheath alloy failure. The aim of the present study is to investigate the performance of the VVER-1000 reactor fuel rod during an LOCA accident using FRAPCON-4.0 and FRAPTRAN-1.5 codes. The sample examined is the VVER-1000 reactor fuel rod in the IFA-650.6 test. Comparison of the obtained results with other published theoretical and experimental results confirms the validity of the code in thermo mechanical analysis of VVER fuel rod. In addition, the simulation results showed that the current safety criteria in the design of LOCA safety systems, it is necessary to consider sheath failure as another safety criterion. This is currently being addressed by the German Commission on Safety (RSK) in the analysis of the LOCA incident.

Keywords: Fuel rod performance, thermo mechanical analysis, FRAPCON code, FRAPTRAN code