

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE ESTOCAGEM DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR IRRADIADO

Flávio Joaquim Ribeiro Vieira

Nanami Kosaka (*)

Coordenadoria de Projetos Especiais da Marinha do Brasil -COPESP- São Paulo-SP

(*) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares -IPEN-CNEN/SP - São Paulo-SP

Travessa R, 400 - Cidade Universitária

05508-900, São Paulo, SP

RESUMO

Foram apresentadas várias tecnologias de estocagem, dando um panorama do que está disponível atualmente a nível mundial, e do que está sendo desenvolvido. Cálculos de temperatura foram realizados, para efeitos de segurança e estimativas de instalações. Um caso prático foi estudado; o de Angra I que já está prestes a enfrentar problemas de estocagem de seu combustível irradiado.

INTRODUÇÃO

No mundo inteiro, grandes quantidades de combustível nuclear irradiado são descarregadas a cada ano. Estudos projetam que, no ano 2000 cerca de 10000 t de metal pesado proveniente de reatores LWR e HWR serão descarregados no mundo, acumulando cerca de 200000 t desde o início da era nuclear, conforme a evolução mostrada na figura 1 /1/.

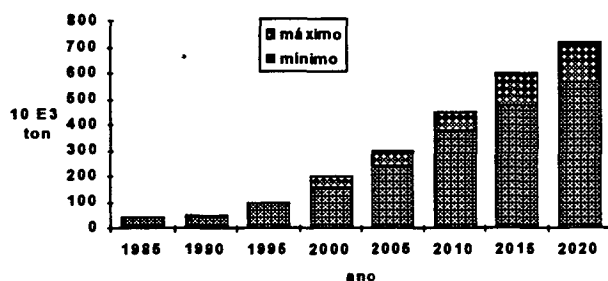


Fig. 1. Descargas acumuladas de combustível LWR no mundo.

Vários países têm estudado as opções sobre o que fazer com seu combustível irradiado, tais como :

- Reprocessamento direto, com reciclagem de Pu e U após curto período de resfriamento.
- Reprocessamento adiado, com reciclagem de Pu e U para futuro uso em reatores PWR's ou para o início de operação dos reatores rápidos regeneradores após estocagem intermediária.
- Descontaminação química do combustível usado em PWR's para uso em HWR após curto período de resfriamento.
- Deposição final do combustível irradiado após longo período de estocagem intermediária.

Como tanto no caso de processamento químico como de deposição final há a necessidade de estocagem intermediária, tecnologias têm sido desenvolvidas neste sentido, em ambientes úmidos (piscinas) e secos.

O reprocessamento do combustível não tem sido realizado em larga escala no mundo, devido principalmente a motivos econômicos. Mesmo assim, alguns países têm reprocessado parte de seu combustível, como Alemanha e França. Na maior parte dos casos, no entanto, a opção tem sido

pela estocagem intermediária até que haja uma política definida. Tal opção visa, a princípio, manter o combustível irradiado armazenado numa instalação apropriada por um período previsto na ordem de 40 anos para depois realizar o reprocessamento ou a deposição final.

Não se espera uma primeira demonstração de instalação de deposição final antes de 2000 / 2020, portanto a estocagem de longo termo tem sido uma preocupação em todos os países com programas nucleares /2/.

No Brasil, até o momento, a opção sobre o que fazer com o combustível irradiado ainda não foi tomada e Angra I tem estocado na piscina da contenção do reator. No entanto, problemas de estocagem já começam a surgir, exigindo a médio prazo uma solução, não só para Angra I como para outros reatores que venham a operar.

Propõe-se neste trabalho analisar as tecnologias de estocagem existentes e realizar cálculos de temperatura na superfície de varetas e de embalagens de estocagem a seco para efeito de segurança e estimativa de instalações e, também, verificar a capacidade da piscina de Angra I para a implantação da compactação de combustível irradiado.

TECNOLOGIAS DE ESTOCAGEM

Estocagem úmida

Até os anos 70, a estocagem úmida foi a principal forma de armazenagem do combustível irradiado no mundo /1/, sendo que a primeira instalação iniciou sua operação em novembro de 1943 nos EUA /2/.

Uma piscina usada para estocagem é uma estrutura de concreto reforçada e revestida com aço inoxidável, onde os elementos combustíveis são armazenados em cestos ou em "racks" montados sobre o fundo /3/. À estocagem no prédio do reator chamamos de AR ("At reactor") e àquela fora do local onde se encontra o reator, necessitando de transporte para fora das instalações, de AFR ("away from reactor"). Essa última já está desenvolvida na Bulgária, Finlândia, Alemanha e Suécia, e nos EUA e Espanha está em estágios avançados /1/. A estocagem em piscinas AR era considerada limitada a 2 anos, mas tem sido praticada por períodos maiores criando assim problemas de disponibilidade de espaço para o recebimento de novas cargas /1/. Esse problema já afeta Angra I.

Quase todas as instalações nucleares estocam, pelo menos inicialmente, seu combustível irradiado em piscinas pois, além de barata e disponível, a água é ótimo refrigerante, proporciona boa blindagem e é transparente (observação e manuseio).

O combustível irradiado fica na piscina do reator por pelo menos 2 anos para resfriamento e redução da atividade antes de seu transporte para outro local e, mesmo se o destino do combustível for a estocagem seca, esse deverá ficar em resfriamento em água por um período entre 2 e 10 anos .

São considerações importantes no projeto de uma piscina : /1/

- prevenção de acidente de criticalidade ;
- proteção da integridade do revestimento da vareta ;
- blindagem radiológica ;
- administração do lixo radioativo.

As piscinas AFR são maiores que as AR. Para estocagem de combustível usado de PWR's o volume vai de 1000 m³ a 1600 m³ ou ainda maiores. A instalação AFR suéca CLAB tem 5 piscinas com 3000 m³ cada /1/.

O combustível usado proveniente de piscinas AR é transportado para as AFR em cascos úmidos ou secos, sendo então alocados em racks estacionários de alumínio ou aço inoxidável ou em cestos removíveis .

A utilização de racks de aço inox borado reduzem consideravelmente a distância entre os centros dos elementos combustíveis. Tal compactação ("re-racking") tem sido comum para elevar a capacidade das piscinas /2/ , /3/.

Existem hoje combustíveis estocados em piscinas por cerca de 40 anos, sem que tenha havido qualquer acidente sério ou defeitos relevantes durante esse tempo. Pode-se considerar como insignificante a degradação dos componentes /2/.

Estocagem em ambientes secos

Vários países concluíram que há muitas vantagens nas tecnologias secas, que já foram licenciadas na Alemanha, Suécia, RU e EUA e, essa parece que é a tendência futura, apesar de que a estocagem úmida ainda seja a mais utilizada e melhor conhecida até o momento.

A estocagem seca apresenta menos problemas de criticalidade, tendo em vista que não há moderador. Desta forma, pode ser mais compacta. Por outro lado, esbarra na blindagem para a qual tem sido usados vários materiais : aço, concreto, grafite, ferro fundido, etc. /1/

Em qualquer dos conceitos de estocagem seca, as cavidades contém um gás, que pode ser ar, nitrogênio, dióxido de carbono, hélio, argônio ou neônio. O uso de gases inertes visa minimizar reações no revestimento das varetas ou nas pastilhas de combustível, além de permitir maiores temperaturas de estocagem, diminuindo a necessidade de resfriamento devido a melhores coeficientes de transmissão de calor /3/.

A opção de estocagem seca tem sido analisada como opção à estocagem úmida temporária e como método de deposição final /1/.

Quatro conceitos já estão maduros :

- câmaras ou adegas ("vaults") ;
- silos ou cascos de concreto ;

- cascos metálicos para transporte e estocagem ;
- poços secos ("dry-wells").

As vantagens desses conceitos são :

- algumas das operações são economicamente mais viáveis que na estocagem úmida ;
- possibilidade de estocagem de longo tempo ;
- baixas doses de irradiação para pessoal e meio ;
- quantidade de resíduos finais menor.

Alguns conceitos secos que usam convecção natural para resfriamento podem ter a vantagem de baixa manutenção e alta confiabilidade devido a poucos equipamentos necessários (bombas, sopradores, etc). /1/

Estocagem em câmaras ou adegas ("vaults")

Uma adega pode se localizar acima ou abaixo do nível do solo, constituindo-se de uma estrutura reforçada de concreto contendo um arranjo de cavidades verticais ou horizontais para o combustível irradiado /3/. A câmara propriamente dita é de projeto relativamente simples, funcionando em esquema de módulos, mas requer instalações adicionais na recepção e embalagem dos conjuntos e para teste dos elementos já embalados /1/.

Tem-se usado a convecção natural em adegas pois, alguns componentes são reduzidos com correspondente redução de custos e maior confiabilidade operacional /3/.

Existem tres diferentes sistemas de adegas disponíveis atualmente. O MVDS da Foster-Wheeler e o CASCAD da SGN consistem de tubos verticais de metal, enquanto no FUELSTOR da KWU/ANF os elementos são estocados horizontalmente em uma estrutura de concreto. Todos os sistemas se prestam à expansão modular /3/.

Silos e cascos de Concreto

O silo é uma grande estrutura monolítica, normalmente de concreto reforçado. O concreto proporciona blindagem, mas a contenção é usualmente um vaso interno de aço, o qual é selado após o carregamento do combustível. Pode ser visto como parte isolada do conceito de câmara, a qual permite a estocagem em unidades simples autônomas podendo ser na posição horizontal ou na vertical. Tem sido usado no Canadá e EUA /3/.

O conceito de silo de concreto é um sistema de estocagem de resfriamento passivo projetado para não requerer sistemas mecânicos, elétricos ou outros. É uma concepção ainda em desenvolvimento e existem poucas construídas /1/, /3/.

O Módulo Único de Blindagem Pesada (HSM) ou sistema NUHOMS é uma instalação passiva onde o combustível irradiado é guardado dentro de uma embalagem de aço inoxidável que é preenchido com gás hélio ou nitrogênio e a embalagem é colocada em um módulo de concreto que fornece a proteção a radiação para operação normal e acidentes previsíveis. O sistema apresenta baixo custo (concreto) e é totalmente passivo. Atualmente, os modelos existentes de embalagem podem conter 7 ou 24 elementos combustíveis PWR cada /3/.

Como sistemas verticais, nos EUA foram desenvolvidos os cascos CP-9 da NUPAC, para 25 elementos PWR e o CONSAR da B&W, para 32 elementos PWR. Esses cascos

utilizam cestos similares àqueles de cascos metálicos. O Canadá usa cascos de concreto para estocar combustível irradiado de HWR /3/.

Cascos metálicos de transporte e estocagem

O casco é uma embalagem massiva para transporte e/ou estocagem de material radioativo, sendo um desenvolvimento relativamente novo baseado em uma tecnologia estabelecida com mais de 30 anos de experiência com cascos de transporte. Os cascos apresentam-se como grandes vasos equipados com cestos internos para receber os conjuntos de elementos combustíveis /1/, /3/.

Esses equipamentos contém uma ou mais cavidades de estocagem com um ambiente controlado. Cada cavidade pode ser projetada para conter vários elementos combustíveis. O confinamento do material radioativo e a blindagem é conseguida primeiramente pelo material estrutural e o aço ou ferro fundido que constituem o casco. A remoção de calor é por condução através do material estrutural para a atmosfera /3/.

Nos EUA, hoje o conceito de cascos metálicos é o mais maduro para a estocagem intermediária seca, pois têm sido testados e demonstrados desde 1984 /1/.

Como os cascos armazenam vários elementos combustíveis, os tempos de decaimento em piscina antes da transferência para a estocagem estão entre 4 e 10 anos. Na tabela 1 estão vários modelos de cascos metálicos já demonstrados /3/.

Tab 1. Modelos de cascos e tempos recomendados para decaimento antes da estocagem.

Modelo	Fabricante / país	Capacidade (PWR)	Tempo (anos)
Castor V/21	GNSI / Alemanha	21	5
Castor-X	GNSI / Alemanha	28	10
MC-10	Westinghouse / EUA	24	10
TN-24	Transnuclear / França	24	5
ST	NAC / EUA	26	5
I28 S/T	NAC / EUA	28	10
C28 S/T	NAC / EUA	56	10
STC	NAC / EUA	26	6,5
DPT	ENSA / Espanha	21	4 / 6

Poços Secos ("drywells")

Um poço seco é uma cavidade individual estacionária, subterrânea e revestida para a estocagem de conjuntos de elementos combustíveis embalados. Cada cavidade pode ser projetada para conter vários elementos combustíveis irradiados. São localizados em áreas cercadas onde são feitos vários poços /3/.

A blindagem é provida pela terra em volta e pela tampa de fechamento ("plug"). A remoção do calor de decaimento se dá pela condução para a terra ao redor, com eventual condução para a superfície da terra e convecção para a atmosfera. Assim, o conceito é passivo e as barreiras protetoras são o revestimento da vareta e a embalagem de aço soldado. O compartimento provém a estrutura para proteger a unidade /1/, /3/.

A cobertura é de concreto e o compartimento é de aço corrugado. Como proteção à corrosão, utiliza-se revestimento,

escolha apropriada do solo ou a proteção catódica /1/.

As principais limitações nesse projeto são: a temperatura máxima (afetando espaçamento dos compartimentos), unidade do solo e proteção anti-corrosiva do compartimento de aço. Ainda, pode haver problemas associados a inundação e desenvolvimento de um sistema de monitoração confiável /1/.

Experiência mundial com estocagem seca

No projeto de sistemas de estocagem deve-se assegurar que a temperatura local de pico na vareta fique dentro dos limites para o conceito específico. As exposições à radiação também devem ficar dentro dos regulamentos de segurança. A segurança das instalações de estocagem a seco está provada para danos internos e externos.

Em experiências realizadas com atmosferas inertes, os limites de 380°C / 400°C são aceitos para temperaturas nos revestimentos de varetas ("cladding"), apesar de terem sido feitos testes na faixa de 400°C / 570°C sem apresentar falhas /2/.

Vários poços secos têm sido testados com combustível LWR nos EUA. Os poços secos precisam condições geológicas específicas não disponíveis em todos os países, como ausência de lençóis freáticos no local e ausência de sismos /1/.

Vários tipos de cascos metálicos têm sido testados na Alemanha, Suécia, ex-USSR e EUA. Já existe uma instalação de cascos Castor de 1500 t na Alemanha, que foi licenciada em 1983 /1/.

Silos de concreto são usados no Canadá (combustível de HWR) e EUA. Os silos de concreto modular NUHOMS já estocavam 9 t de U até o final de 1988 /1/.

As câmaras ou adegas ("vaults") são mais usadas para combustível de Magnox ou para resíduos de alto nível na forma vitrificada. Recentemente iniciou-se estudos na França, Alemanha e UK para adaptar o processo à estocagem de combustível LWR /1/.

Quanto à deposição final, nos EUA estão sendo feitos estudos para a caracterização do local apropriado. /1/.

CÁLCULOS DE TEMPERATURA

Com o objetivo de estimar condições para várias tecnologias de estocagem e assim ter as primeiras informações necessárias para um pré-projeto de instalações, torna-se preciso realizar certos cálculos que forneçam uma aproximação das temperaturas esperadas em varetas e em superfícies de embalagens. Desta forma, foram desenvolvidos dois programas de computador que realizam tais cálculos, de uma maneira aproximada /4/, sendo que um deles considerou apenas o efeito de convecção e outro também considerou a radiação (temperaturas acima de 150°C) admitindo-se convecção natural, tendendo sempre para o lado da superestimação dos resultados.

Foram estimadas temperaturas na superfície de varetas, embalagens únicas (piscinas, adegas ou poços secos) e embalagens múltiplas (cascos). Todos foram feitos para dados de Angra I e Angra II. Para os casos de ambientes úmidos, os tempos de decaimento considerados foram na ordem de dias, enquanto em ambientes secos foram na ordem de anos, devido à grande diferença do poder de extração de calor entre os dois, resultando em temperaturas em água muito mais baixas que em ar, o que justifica a não necessidade de cálculos para tempos prolongados em resfriamento em água.

Os calores de decaimento utilizados na execução dos programas foram obtidos pela utilização do código ORIGEN-2 /5/ e admitiu-se uma temperatura do meio num ponto distante

de 30°C. Quando a temperatura resultava acima de 150°C, usou-se o programa que considera o efeito de radiação.

As tabelas 2 e 3 indicam as temperaturas calculadas em superfícies de varetas dentro de elemento combustível. Uma coluna mostra a temperatura média de superfície das 235 varetas de um elemento, outra coluna apresenta a temperatura estimada na superfície da vareta mais quente do elemento.

Tab 2. Temperaturas calculadas para superfície de varetas de elementos de Angra I

Tempo de decaimento	Calor/varreta (Watts)	Meio	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)
10 d	150,7	úmido	57	67
30 d	90,9	úmido	48	60
60 d	63,5	úmido	43	47
90 d	50,6	úmido	41	45
2 a	9,0	seco	233	427
3 a	5,5	seco	159	271
4 a	3,8	seco	119	191
5 a	3,0	seco	100	154

Nota : d - dias; a - anos

Tab 3. Temperaturas calculadas para superfície de varetas de elementos de Angra II

Tempo de decaimento	Calor/varreta (Watts)	Meio	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)
10 d	192,0	úmido	60	72
30 d	116,8	úmido	50	58
60 d	82,6	úmido	44	48
90 d	66,5	úmido	42	45
2 a	12,5	seco	267	487
3 a	7,7	seco	178	304
4 a	5,4	seco	135	217
5 a	4,3	seco	113	173

Para estocagem de um único elemento, no caso úmido, verificamos que não haveria problemas quanto à temperatura na superfície das varetas após 10 dias de decaimento. Em ambiente seco, combustíveis, tanto de Angra I quanto Angra II, poderiam ser estocados após 3 anos de decaimento e estariam dentro dos limites aceitos (380°C-400°C).

A tabela 4 apresenta temperaturas em embalagens únicas cilíndricas, que podem ser usadas no dimensionamento de instalações do tipo adegas ou poços secos. Os cálculos são apresentados para tempo de decaimento acima de 2 anos pois, tais embalagens se prestam a estocagem seca.

Tab. 4. Temperaturas calculadas para a superfície de embalagem de aço única em ambiente seco.

Tempo (anos)	Angra I		Angra II	
	Calor (W)	Temperatura (°C)	Calor (W)	Temperatura (°C)
2	2106	136	2940	157
3	1288	103	1818	115
4	898	83	1279	94
5	699	73	1002	83
10	437	60	630	67
15	376	57	542	63
20	339	55	489	60
30	283	52	409	56

Nas tabelas 5 e 6, encontram-se resultados de temperaturas calculadas para tres cascos metálicos cujas dimensões foram encontradas na literatura /3/ e de um quarto casco estimado de 40 elementos (descarga anual proveniente de Angra I).

Tab. 5. Temperaturas calculadas para a superfície de cascos metálicos em meio seco para Angra I.

Tempo dec.(anos)	Temperatura (°C)			
	NAC-STC	NAC-S/T	ENSA-DPT	40 est.
5	110	117	98	129
10	83	88	75	97
15	77	81	70	90
20	73	76	66	85
30	66	70	61	78
40	61	64	56	72
50	57	60	53	67

Tab. 6. Temperaturas calculadas para a superfície de cascos metálicos em meio seco para Angra II.

Tempo dcc.(anos)	Temperatura (°C)			
	NAC-STC	NAC-S/T	ENSA-DPT	40 est.
5	140	149	123	141*
10	103	110	92	120
15	94	100	85	110
20	89	94	80	104
30	80	85	73	94
40	74	78	67	87
50	68	71	62	81

Nota : * - efeito de radiação considerado

COMPACTAÇÃO DA PISCINA DE ANGRA I

Pelo projeto inicial, a piscina de Angra I tem capacidade para 363 elementos irradiados /6/, o que não é suficiente para a vida prevista do reator. Para tal, seriam necessárias 1290 posições.

A compactação ("re-racking") é a solução imediata mais econômica enquanto não existe uma decisão sobre qual será o sistema adotado. Assim, baseado em estudos de criticalidade realizados anteriormente /7/, foi feito um estudo e sugerido um arranjo possível.

As dimensões da piscina de Angra I /7/ são :

comprimento (m)	15,9
largura (m)	5,4
profundidade (m)	12,9

Vários arranjos foram tentados até atingir o descrito abaixo.

Quando da compactação, é importante verificar se a fundação da piscina suporta o peso adicional pois a massa a ser estocada será mais de 3,5 vezes maior. Tal verificação não foi realizada nesse estudo por falta de dados, mas deverá ser feita no caso real.

Foram escolhidos rack's de 7 x 7 elementos. Conforme estudos de criticalidade realizados /7/, podemos reduzir as dimensões entre centros de tal forma que nos elementos das extremidades o passo seja de 25 cm e nos intermediários de

22,5 cm . Assim, cada rack quadrado terá 162,5 cm de lado /4/ - ver fig 2

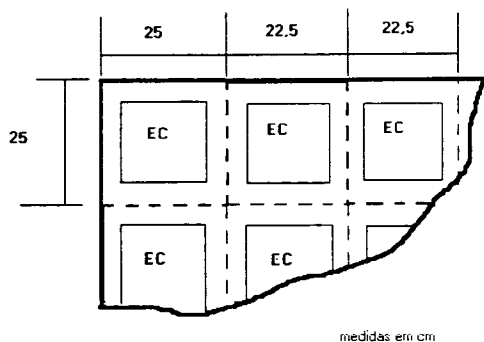


Fig 2 - Esquema do arranjo dos elementos combustíveis num rack compacto.

No entanto, deve haver um espaçamento entre os rack's para a passagem de água e garantir a não interferência de temperaturas. Para tal, é aconselhável um espaçamento de alguns centímetros.

A utilização desses rack's permitiria armazenar 49 elementos por rack, com 3 rack's no sentido da largura e de 9 rack's no comprimento, totalizando 1323 elementos estocados. Isso seria suficiente para a vida de Angra I.

O espaço tomado pelos rack's no sentido da largura será $3 \times 162,5 \text{ cm} = 487,5 \text{ cm}$. No sentido do comprimento será $9 \times 162,5 \text{ cm} = 1462,5 \text{ cm}$.

Assim, conforme as dimensões da piscina da tabela 5, o espaço que irá sobrar é de

$540 - 488 = 52 \text{ cm}$ na largura e $1590 - 1463 = 127 \text{ cm}$ no comprimento

Então, $52 / 4 = 13 \text{ cm}$ e $127 / 10 = 12,7 \text{ cm}$

Ajustando essas medidas, podemos ter uma configuração conforme a fig 3.

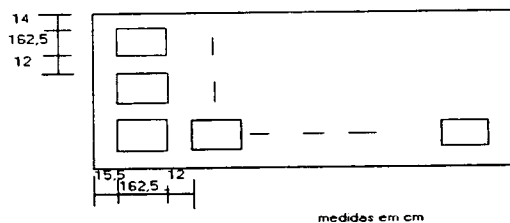


Fig 3 - Arranjo de rack's compactados na piscina de Angra I

CONCLUSÕES

Futuramente o Brasil poderá se deparar com problemas de estocagem de combustível nuclear irradiado e, terá de fazer uma opção. Dentro deste espírito, fêz-se uma análise das tecnologias atualmente disponíveis e em desenvolvimento no mundo. Como solução imediata, a compactação ("re-racking") da piscina de Angra I pode ser feita para a estocagem de seu combustível.

A opinião pública, a maturidade da tecnologia, custo e decisão política serão os fatores que mais influenciarão na escolha.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng. Adriano Lobo de Souza, pelo auxílio nos cálculos de temperaturas e pelas importantes sugestões.

REFERÊNCIAS

- [1] Guidebook on Spent Fuel Storage - 2nd ed. - Tech.Rep.Series n.240 IAEA, Viena, 1991.
- [2] Survey of Experience with Dry Storage of Spent Nuclear Fuel and Update of Wet Storage Experience - Tech.Rep.Series n.290 IAEA, Viena, 1988
- [3] Johnson, E.R. Overview of Spent Fuel Interim Storage Technologies - Description of Alternatives, notas de aula do seminário INSTN, Paris, 1993
- [4] Holman, J.P. Heat Transfer McGraw-Hill, 4th ed, Tokyo, p.235-55, 1976
- [5] ORIGIN-2 Isotope Generation and Depletion Code, Oak Ridge National Laboratory, USA, 1980.
- [6] Safety Analisys Report - Angra I Vol I.
- [7] Teixeira, M.C.C. Cálculo de Criticalidade da Piscina de Combustível Usado, com rack supercompacto para Angra I In anais do IV CGEN, p.423-26, 1992.

ABSTRACT

The worldwide available spent fuel storage technologies are analyzed. Temperatures at the surfaces of fuel rod clad and storage cannisters are calculated for storage safety and design estimation purposes. An actual case for Angra I reactor is also studied.