

BWRの過酷事故において、「計装管破損等による窒素(N₂)又は空気(O₂/N₂)のインリーク」が「被覆管破損前のふるまい」に与える影響に関する学術的知見の調査と評価結果を報告します。

この現象は、BWRの格納容器(ドライウェル)が窒素でイナート化されていること、また事故の進展(例:LOCA後の減圧、計装管の破損)により、これらのガスがRPV内に逆流(インリーク)し、高温の被覆管と反応する可能性を指します。特に**空気(O₂)**の侵入は、水蒸気酸化をはるかに上回る激しい発熱反応を引き起こし、事故進展を急激に加速させる可能性があります。

この現象は、炉心が高温になり、かつインリークが発生し得る第1フェーズおよび第2フェーズで重要となります。

I. 情報収集(共通)

1. ランドマーク論文の特定

空気(O₂/N₂)とジルカロイの高温反応に関する知見は、TMI-2事故の教訓や、1F事故(福島第一)[4.1]を受けて、PHEBUS、CORA、QUENCHなどの大規模実験プログラム[1.2]や、多くの分離効果試験([4.2]など)で精力的に研究されてきました。

論文タイトル	著者名	DOI又はURL(書誌情報)	主要な発見(研究成果)
【実験的研究(積分・分離効果)】			
1. A comparison of core degradation phenomena in the CORA, QUENCH, Phébus...	(Review)	10.1016/j.nucengdes.2014.12.022 (Nucl. Eng. Des., 2015)	主要なSA積分実験(CORA, QUENCH, PHEBUS)[1.2]の比較レビュー。これらの実験で、水蒸気だけでなく空気(Air)[4.1]や窒素(N ₂)[4.2]の影響も調査されたことを示している。

2. QUENCH-10 Experiment on Air Ingress: Separate Effects Tests...	M. Steinbrück, et al.	10.1016/j.nucengdes.2007.01.008 (<i>Nucl. Eng. Des.</i> , 2007)	QUENCH-10実験([4.2])。空気侵入(Air Ingress)[4.2]に特化した実験。水蒸気で予備酸化された被覆管が高温(>1000°C)で空気に晒されると、ZrN(窒化ジルコニウム)[2.2]が形成され、その後の酸化で急激な温度上昇([4.2])が起こる「窒化/酸化シーケンス」を実証した。
3. Oxidation of Zircaloy-4 in oxygen-nitrogen mixtures at high temperatures	M. Steinbrück, et al.	10.1016/j.jnucmat.2009.11.021 (<i>J. Nucl. Mater.</i> , 2010)	O ₂ /N ₂ 混合ガス(模擬空気)[1.3]を用いたジルカロイ酸化の分離効果試験。窒素(N ₂)の存在が酸化速度([1.3])に複雑な影響を与えることを示し、ZrN形成([1.3])の重要性を確認した。
4. Oxidation of Zircaloy-4 under Limited Steam Supply...	S. Kawasaki, et al.	10.1080/18811248.1986.9735077 (<i>J. Nucl. Sci. Technol.</i> , 1986)	水蒸気枯渇([2.1])実験。N ₂ やAr(不活性ガス)[2.1]をキャリアガスとして使用。不活性ガス(N ₂)のインリークは、水蒸気分圧を低下([2.1])させ、水蒸気酸化を抑制([2.1])する効果(タスク【134P】のSteam Starvationと類似)を持つことを示した。

5. Review of Zircaloy Oxidation	(Review)	https://proceedings.cns-snc.ca/index.php/pcns/article/download/4970/4969/5005 (CNS Proc., 1993)	ジルカロイ酸化 ([1.2]) のレビュー。水蒸気 ([1.1]) だけでなく、空気 ([1.2]) や窒素 ([1.2]) との反応についても言及し、空気酸化 ([4.2]) がより大きな発熱を伴うことを指摘した。
6. Evaluation of Fukushima Daiichi Unit 1 Ex-Vessel Phenomenon...	A. Cibula, et al.	10.1080/00295450.2024.2339578 (<i>Nucl. Technol.</i> , 2024)	1F1号機 ([5.4]) の分析。PCV内部の調査 ([5.4]) は、MCCIやFP移行の知見 ([5.2]) に貢献。計装管破損 ([5.3]) によるN ₂ インリークは、1F事故のRPV圧力挙動 (減圧) [4.1] を説明する上で重要な因子として解析 ([4.1]) されている。
【解析・モデリング】			
7. SCDAP/RELAP5/MOD3.3 Code Manual: Vol. 2: Severe Accident Models	(US NRC)	https://www.nrc.gov/docs/ML0103/ML010370328.pdf (NUREG/CR-6150, Vol. 2, Rev. 2)	SA統合コード SCDAP/RELAP5 ([5.3]) の解説。燃料棒の酸化 ([5.3]) モデルを搭載。水蒸気 ([1.1]) だけでなく、空気 (O ₂ /N ₂) [2.2] との反応 (酸化・窒化) もモデル化している。
8. MELCOR computer code manuals	(US NRC / SNL)	(Cited in [3.1]) (NUREG/CR-6119)	SA統合コード MELCOR ([3.1], [4.1]) の解説。SCDAPと同様、ジルカロイと水蒸気、酸素、窒素との化学反応 ([1.1])

			を標準モデルとして搭載している。
9. Uncertainty analysis of ATF Cr-coated-Zircaloy on BWR in-vessel accident progression...	(Researchers)	10.1016/j.energy.2021.120612 (<i>Energy</i> , 2021)	BWRのSA解析([6.4])。MELCOR([6.4])を用い、ATF(事故耐性燃料)[6.4]の空気酸化([4.2])耐性を評価。従来のジルカロイの空気酸化([1.2, 4.2])がSA進展を加速([6.2, 6.3])させることを前提としている。
10. Core Loss During a Severe Accident (COLOSS Project)	(IRSN / GRS)	https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/larecherche/.../COLOSS_rapport_Final_1.pdf (SARNET, 2013)	COLOSSプロジェクト([3.3])報告。QUENCH実験([1.2, 3.3])などに基づき、SAコード(SCDAP[3.3], ICARE[3.1])の酸化モデル([3.3])の検証・改良が行われた。

2. 研究トレンドの抽出

- 主要な理論(モデル):

1. 空気酸化(**Zry-O₂**): 酸素(O₂)[2.2, 4.2]は水蒸気(H₂O)よりも強力な酸化剤であり、Zrと激しく反応([1.1])し、より大きな発熱([6.2])を伴う。これにより温度が急上昇([4.2])し、炉心溶融が加速される。
2. 窒化(**Zry-N₂**): 窒素(N₂)[2.2]も高温(>1000℃)でZrと反応し、ZrN(窒化ジルコニウム)[1.3, 2.2]を形成する。
3. 窒化/酸化シーケンス("Pilling-Bedworth"破壊): QUENCH-10実験([2.2])で実証された重要なメカニズム。まず水蒸気で酸化膜(ZrO₂)が形成され、次に空気(N₂)が侵入すると、窒素が酸化膜の亀裂([1.3])を通して内部の金属Zrと反応しZrN([2.2])を形成する。このZrNが再び酸素や水蒸気に触れると、非常に急速な酸化反応に転じ、急激な温度上昇([4.2])と酸化膜の破壊([4.2])を引き起こす。

4. 不活性ガス(N_2)による希釈: 窒素(N_2)が(反応しない)不活性ガスとしてインリークした場合、炉内の水蒸気分圧を低下([2.1])させ、水蒸気酸化(H_2 生成)を抑制する(タスク【134P】のSteam Starvation[2.1]と同様の効果)。
 - 共通の研究手法(実験/解析):
 1. 実験(分離効果試験): 制御された高温・ガス雰囲気(純粋な O_2 、 N_2 、空気[1.3]、または混合ガス[1.3])中でジルカロイ試験片([1.1])を加熱し、酸化・窒化の速度論([1.1, 1.3])やメカニズム([2.2])を調査する。
 2. 実験(炉外積分実験): QUENCH([4.2])やCORA([1.2])など、燃料バンドル([2.3])を用い、まず水蒸気で酸化させた後、空気を吹き込む(Air Ingress)[4.2]シーケンス実験を行い、窒化/酸化シーケンス([2.2])による急激な温度上昇([4.2])を実証する。
 3. 解析(SAコード): MELCOR([4.1, 6.2, 6.3])やSCDAP([5.3])など、空気・窒素酸化([1.1])と窒化([2.2])の反応速度論モデル([3.1])を標準搭載したコードを用い、上記[1]~[2]の実験([4.2, 1.2])とのベンチマーク([3.3, 4.1])を行う。
-

3. 残存課題の明確化

1. 窒化/酸化シーケンスの複雑性: 空気侵入時([4.2])の窒化([2.2])と酸化([1.3])の競合・連成プロセス([3.1])は非常に複雑であり、特に酸化膜が破壊([1.3])されるメカニズムや、それが温度・雰囲気([2.1])にどう依存するかモデル化には不確かさが残る。
 2. BWR(1F)特有の N_2 インリークの影響: 1F事故([4.1])では、窒素(空気ではない)が計装管([5.3])からRPV内にインリークしたと推定([4.1])されている。この「窒素のみ」のインリークが、(a) 水蒸気酸化の抑制(希釈効果[2.1])と(b) 窒化([2.2])のどちらに寄与したか、その影響の定量的評価は不十分である。
 3. SAコードの成熟度: SAコード([5.3, 4.1])は空気・窒素反応モデル([3.1])を搭載しているが、QUENCH-10実験([4.2])のような急激な温度上昇(窒化/酸化シーケンス[2.2])の再現性([3.3])には、まだ改善の余地がある。
-

II. 知見の程度評価: 数値指標化

評価対象は、事故シーケンスにおける第1フェーズおよび第2フェーズ(空気・窒素インリークによる高温反応)です。

【フェーズ 1-2】(空気・窒素インリークによる反応)

1. 実験的知見の程度の数値化

指標	スコア	評価理由
A. 実験データの有無	4.5	空気・窒素とジルカロイの反応は、分離効果試験([1.3], [2.1])およびQUENCH([4.2])、CORA([1.2])などの積分実験([1.2])において豊富にデータが蓄積されている。1Fの観測([4.1, 5.1])も存在する。
B. 実機との類似性	4.0	QUENCH-10([4.2])などは、水蒸気酸化後の空気侵入([4.2])という実機SAシーケンス([6.1])を模擬しており、類似性は高い。BWRの窒素イナータート([4.1])や計装管破損([5.3])も考慮されている。
C. 実験範囲の充足性	3.5	温度([1.1, 1.3])、ガス組成(O_2/N_2 比[1.3])、水蒸気共存([2.1])といった主要パラメータはカバーされている。しかし、窒化/酸化シーケンス([2.2])の複雑なメカニズム([1.3])の全容解明には至っていない。
実験的知見 総合スコア($SS_{(E)}$)	4.00	
$SS_{(E)}$ 評価理由:	強みは、空気侵入([4.2])がSAの重要な課題として認識され、QUENCH([4.2])やPHEBUS([1.2])など、実機を高度に模擬した大規模実	

	<p>験(A=4.5, B=4.0)が実施されている点です。一方、弱みは、観測された現象(窒化/酸化シーケンス[2.2])が非常に複雑([1.3])であり、そのメカニズムを完全に理解・網羅(C=3.5)するには至っていない点です。</p>	
--	---	--

2. 解析的知見の程度の数値化

指標	スコア	評価理由
D. 解析モデルの有無(標準化)	4.5	SAコード(MELCOR[4.1]、SCDAP[5.3])には、空気酸化([1.2])および窒化([1.3, 2.2])の反応速度論([3.1])が標準モデルとして搭載されている。
E. 解析モデルのスケールビリティ	4.0	モデル([3.1])は、実験室スケール([1.3])から実機炉心([4.1, 6.2])まで適用されている。
F. 解析モデルの成熟度(信頼性)	3.0	水蒸気酸化([1.1])や単純な空気酸化([4.2])のモデルは成熟している。しかし、QUENCH-10([4.2])などで観測された「窒化/酸化シーケンス」([2.2, 4.3])による急激な温度上昇の予測信頼性([3.3, 5.1])は低く、モデルの成熟度に課題が残る。
解析的知見 総合スコア(3.83	

$S_{\{A\}}$		
$S_{\{A\}}$ 評価理由:	強みは、空気・窒素酸化/窒化([1.1, 1.3, 2.2])を扱う標準モデル(D=4.5)がSAコード([4.1, 5.3])に整備され、実機解析([6.2, 6.3])に適用(E=4.0)されている点です。一方、弱みは、実験([4.2])で観測された最も過酷な現象である「窒化/酸化シーケンス」([2.2])の再現性(F=3.0)が不十分であり、モデルの信頼性([3.3, 5.1])に課題が残る点です。	

III. 総合的な知見の程度の数値化と結論

1. 総合評価スコア($S_{\{Total\}}$)の算出

フェーズ 1-2 (空気・窒素インリーク):

$$S_{\{Total\}} = (S_{\{E\}} \times 0.5) + (S_{\{A\}} \times 0.5) = (4.00 \times 0.5) + (3.83 \times 0.5) = 2.00 + 1.915 = \text{3.92}$$

フェーズ 3-5:

$$S_{\{Total\}} = \$ - (\text{対象外})$$

2. スコアが示す知見の程度

初期段階[U](1.0-2.5)、発展途上[P](2.51-4.0)、成熟期[K](4.01-5.0)

時間フェー	SE	SA	STotal	知見の程度	結論(評価)
-------	----	----	--------	-------	--------

ズ					理由)
第1～2 フェーズ	4.00	3.83	3.92	発展途上 [P]	<p>空気 (O₂/N₂) インリークによる被覆管の酸化・窒化は、SA 進展を急激に加速させる重要現象として、QUENCH-10 などの大規模実験で詳細に研究されてきた。しかし、水蒸気酸化膜と窒素が引き起こす「窒化/酸化シーケンス」という複雑なメカニズムの定量的予測は依然として困難であり、解析モデルの成熟度にも課題が残るため、知見は「発展途上」の上位と評価される。</p>
第3～5 フェーズ	-	-	-	-	対象外。

3. 今後の優先課題

$SS_{\{A\}}$ (3.83) が $SS_{\{E\}}$ (4.00) よりもわずかに低いスコアとなりました。

これは、QUENCH-10 ([4.2]) などの実験 ($SS_{\{E\}}$) によって、「窒化/酸化シーケンス」([2.2]) という複雑で危険な現象が観測 ($SS_{\{E\}}=4.00$) されたものの、その複雑なメカニズム ([1.3]) を正確に予測するための解析モデル ($SS_{\{A\}}$) の成熟度 ($F=3.0$) が追いついていないことを示しています。

したがって、今後の優先課題は「解析モデルの理論的厳密化」にあります。

- 窒化/酸化シーケンスモデルの精緻化:
QUENCH-10実験 ([4.2]) などで観測された、窒素 (N_2) [2.2] の侵入による酸化膜の保護性喪失 ([4.3]) と、その後の急激な酸化 ([4.2]) プロセスについて、その発生条件 (温度、雰囲気、酸化膜厚) をより物理的にモデル化し、標準SAコード ([3.1, 5.3]) の予測信頼性 ([5.1]) を向上させること。
- BWR (窒素インリーク) の評価:
1F事故 ([4.1]) で示唆された「窒素 (N_2) のみ」のインリーク ([4.1]) が、(a) 水蒸気酸化の抑制 ([2.1]) として働くか、(b) 窒化 ([2.2]) による劣化を促進するか、その影響をSAコード ([4.1]) で明確に評価・検証すること。