

燃料デブリ特性リスト (1)
マイクロ性状表

構成見直し中

特性リスト (マイクロ性状表)

Category	Density	Vickers hardness	Elastic modulus	Fracture toughness	Thermal conductivity	Specific heat	Melting point
Materials/Phases	(g/cm ³)	(GPa)	(GPa)	(MPa·m ^{1/2})	(W/mK)	(J/g·K)	(°C)
Oxide							
UO ₂	11	6	190	2	10	0.3	2850
ZrO ₂ -T	6	11	200	10	1-3	0.6	(tr.)
(U,Zr)O ₂ -C	6-11	6-18	140-220	3	1-10	0.3-0.6	2500-2850
(Zr,U)O ₂ -T	6	6-18	150-200	8	1-3	0.5-0.6	(tr.)
SiO ₂	2-3	4-17	100	1	1	1.3	1710
Al-Ca-Si-O	2-3	4-12	40-80	1	1	0.8	1600-1700
Cr ₂ O ₃	5	22-29	100-240	1	10-33	0.8	2400
Fe ₃ O ₄	5	7	20-110	2	20	0.8	1597
(Zr,U)SO ₄	4-9	8-11	20-110	2	6	0.5-0.8	(d.)
UO ₄ ·4H ₂ O	4	0-1	30-50	1	1-10	0.4	(d.)
Metal							
Zr γ -2	7	1-3	60-110	15	23	0.3	1850
α -Zr(O)	7	2-11	120-210	3-5	23	0.3	1850-2130
SUS/Fe	8	1-10	190-200	200	80	0.4	1075-1535
Fe ₂ (Zr,U)	7-8	7-9	160-200	3	80	0.4	1500
Others							
B ₄ C	3	24	450	5	29	2.3	2450
ZrB ₂	6	19-22	440	10	24	0.7	3040
Fe ₂ B	7	16	200	10	24	0.6	1389

Legend: tr. : phase transition d. : decomposition

各物性値の設定理由（利用先の想定）

- Density（密度）： 取出し工具の把持（吊り上げ等）能力、取出し工具および収納缶の耐荷重設計等の参考値として利用。不確実性を加味して有効数字1桁で記載。
- Vickers hardness（ビッカース硬さ）： 切削・研削等機械加工系の取出し工具の刃材料選定への利用を想定。またじん性評価に利用。不確実性を加味して整数値で記載。
- Elastic modulus（弾性率）： じん性評価に利用。脆性破壊における理想強度がおおよそ弾性率に比例することから、強度の参考値としても利用。不確実性を加味して2桁で記載。
- Fracture toughness（破壊じん性）： おおよその壊れ（割れ）やすさの参考値として利用。下限については議論できない（構造的な条件などで0に近づく）ので原則最大値を記載。不確実性を加味して整数値で記載。（0.5未満の場合は、切り上げて1とした。）
- Thermal conductivity（熱伝導率）： 収納容器、輸送容器等の熱設計および取出し破碎時の冷却方法検討などに利用。不確実性を加味して整数値で記載。
- Specific heat（比熱）： 熱的工具の検討や収納容器、輸送容器等の熱設計などに利用。不確実性を加味して小数第1位までで記載。
- Melting point（融点）： 物質が溶融する温度。溶断等熱的工法の検討に利用。

各化合物の想定

主に熱力学平衡計算と当事業で実施した試験結果から暫定的に設定した。

本事業の炉内付着物の分析結果と既存の事故進展シナリオとの整合[H30]に基づきその存在が改めて示唆されたものについては、なお書きにて記載した。

Oxide (酸化物)

UO ₂ :	燃料マトリックスとして存在。切り株燃料や、物理的に破壊されたのみの燃料ミートが中心。
ZrO ₂ -T :	ジルカロイ被覆管が酸化したもの。
(U,Zr)O ₂ -C :	燃料と被覆管が熔融混合して生成。大部分はウランリッチ。一部 CaO などの固溶によりジルコニウムリッチでも存在。RPV 内燃料デブリおよび MCCI 生成物のメインマトリックスのひとつ。 なお、1号機や3号機の PCV 内サンプルの分析結果と事故進展に係る従来の検討結果が整合することから、酸化物の構成成分のひとつである可能性あり。
(Zr,U)O ₂ -T:	燃料と被覆管が熔融混合して生成。大部分はジルコニウムリッチ。RPV 内燃料デブリおよび MCCI 生成物のメインマトリックスのひとつ。 なお、1号機や3号機の PCV 内サンプルの分析と事故進展に係る従来の検討結果が整合することから、酸化物の構成成分のひとつである可能性あり。
SiO ₂ :	コンクリートの劣化物。主にコンクリート骨材の熔融再固化物。MCCI 生成物のメインマトリックスのひとつ。
Al-Ca-Si-O :	コンクリート劣化物。熔融したコンクリートが急冷してガラス化または再結晶化したもの。MCCI 生成物のメインマトリックスのひとつ。
Cr ₂ O ₃ :	ステンレス鋼の熔融後、クロムのみ酸化、析出したもの。ごく微細な組織で生成。
Fe ₃ O ₄ :	ステンレス鋼の熔融後、鉄が酸化、析出したもの。ごく微細な組織で生成。
(Zr,U)SiO ₄ :	MCCI によってのみ生成する(U,Zr)O ₂ と SiO ₂ の反応物。千数百°C程度で比較的長時間保持される MCCI 下層にできる。
UO ₄ ・4H ₂ O :	UO ₂ と水中に放射線分解で生成した H ₂ O ₂ が反応して生成する微細デブリ。

各化合物の想定

Metal (金属)

- Zry-2 : 被覆管の残り。
なお、2号機のペDESTAL床部で存在が示唆されている金属を多く含むデブリの構成成分のひとつである可能性あり。
- α -Zr(O) : 被覆管に酸素が溶存するもの。Zr リッチな金属デブリ中に生成。
なお、2号機のペDESTAL床部で存在が示唆されている金属を多く含むデブリの構成成分のひとつである可能性あり。
- SUS/Fe : SUS やインコネル、およびその溶融固化物。
なお、2号機のペDESTAL床部で存在が示唆されている金属を多く含むデブリの構成成分のひとつである可能性あり。
- Fe₂(Zr,U) : SUS 等の構造材と被覆管が溶融、反応してできた金属間化合物。主に RPV 底部の金属デブリとして生成。
なお、2号機のペDESTAL床部で存在が示唆されている金属を多く含むデブリの構成成分のひとつである可能性あり。

Others (その他)

- B₄C : 制御材の残り。ほとんどが酸化し揮発または冷却水に溶解するため少量と考えられる。
- ZrB₂ : 制御材と燃料被覆材の反応生成物。局所的に酸素分圧が低い状態となった場合に生成。
なお、2号機のペDESTAL床部で存在が示唆されている金属を多く含むデブリの構成成分のひとつである可能性あり。
- Fe₂B : 制御材と構造材の反応生成物。局所的に酸素分圧が低い状態となった場合に生成。
なお、2号機のペDESTAL床部で存在が示唆されている金属を多く含むデブリの構成成分のひとつである可能性あり。

各暫定値の設定根拠（ミクロ性状表） #1

化合物/相	物性	設定根拠
UO ₂	密度	文献値[CRC]を参照した。
	硬さ	文献値[CRC]を参照した。
	弾性率	文献値[CRC]を参照した。
	じん性	文献値[Yamada]を参照した。
	熱伝導率	文献値[CRC]より 100°C の値とした。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献値[ふるまい]を参照した。
ZrO ₂ -T	密度	3%Y ₂ O ₃ 安定化ジルコニアの格子定数[Martin]より算出した。
	硬さ	ZrO ₂ partially stabilized の文献値[CRC]とした。
	弾性率	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊靱性－弾性率）より相当する材料の最大値（読み取り値）とした。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊靱性－弾性率）より相当する材料の最大値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献[CRC]より ZrO ₂ の値とした。構造による違いは考慮しないものとした。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	高温（約 2300°C）で ZrO ₂ -C へ相転移する[状態図]ため融点データ無し。
(U,Zr)O ₂ -C	密度	固溶体の格子定数がベガード則（※1）にしたがうものとして 0-100%ZrO ₂ -C の組成範囲について UO ₂ と ZrO ₂ -C の値を案分した。なお、ZrO ₂ -C については、15%CaO 安定化ジルコニアの格子定数[Martin]より求めた。
	硬さ	文献値[Wright]およびこれまでの当事業の成果[H24] [H25] [H26] [H27] [H29] [Yano] [Hoshino]を参照した。U/Zr 比、O/M 比、不純物の影響（Fe 及び ZrO ₂ 安定化剤効果）の影響を考慮し、TMI-2 デブリの測定結果を加味して設定した。
	弾性率	これまでの当事業の成果[H24] [H25] [H26] [Yano] [Hoshino]を参照した。
	じん性	これまでの当事業の成果[H24] [H25] [H26] [Yano] [Hoshino]を参照した。
	熱伝導率	これまでの当事業の成果[H24][Kato]を参照した。
	比熱	最小値を UO ₂ の値、最大値を ZrO ₂ -T の値と仮定した。
	融点	文献値[Cohen]およびこれまでの当事業の成果[H24][Kato]を参照した。

各暫定値の設定根拠（ミクロ性状表） #2

化合物/相	物性	設定根拠
(Zr,U)O ₂ -T	密度	固溶体の格子定数がベガード則（※1）にしたがうものとして 70-100%ZrO ₂ の組成範囲について UO ₂ と ZrO ₂ の値を案分した。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [H26] [H29] [Hoshino]を参照した。
	弾性率	これまでの当事業の成果 [H26] [Hoshino]を参照した。
	じん性	これまでの当事業の成果 [H26] [Hoshino]を参照した。
	熱伝導率	これまでの当事業の成果 [H24][Kato]を参考に、ZrO ₂ と同等とした。
	比熱	最小値は組成に比例することを仮定の上 30%UO ₂ -70%ZrO ₂ として計算、最大値は ZrO ₂ と同等とした。
	融点	文献[Cohen]より、2000°C近傍（組成による）において立方晶に転移するため融点データは無し。
SiO ₂	密度	Web サイト[Wikipedia]の情報を参照した。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [H29] および文献値[CRC]を参照した。
	弾性率	Web サイト[Wikipedia]の情報を参照した。
	じん性	文献[Shinkai]より Fused Silica の値とした。
	熱伝導率	文献[CRC]より 200°Cの SiO ₂ の値とした。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献[Perrys]より crystobalite の値を参照した。
Al-Ca-Si-O	密度	文献[CRC]より 0.04%-70%Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (glass)の値とした。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [H29] および文献[CRC]における SiO ₂ -Na ₂ O glass の値を参照した。
	弾性率	文献[CRC]より 20°C の SiO ₂ glass の値とした。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊じん性－弾性率）よりガラスの値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献[CRC]より 20°C の SiO ₂ glass の値とした。
	比熱	Web サイト[Ceram]の情報より石英ガラスの値とした。
	融点	Web サイト[Ceram]の情報より石英ガラスの値とした。

各暫定値の設定根拠（ミクロ性状表） #3

化合物/相	物性	設定根拠
Cr ₂ O ₃	密度	文献値[CRC]を参照した。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [H27]および文献値[CRC]を参照した。
	弾性率	これまでの当事業の成果 [H27]および文献値[CRC]を参照した。
	じん性	これまでの当事業の成果 [H27]を参照した。
	熱伝導率	文献値[CRC]を参照した。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	Web サイト[Toishi]の情報を参照した。
Fe ₃ O ₄	密度	Web サイト[Webmineral]の磁鉄鉱（Magnetite）の情報を参照した。
	硬さ	Web サイト[Webmineral]の磁鉄鉱（Magnetite）の硬さ（モース硬さ）から web サイト[iStone]のモース硬度計とビッカース硬度計の比較より推定した。
	弾性率	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊じん性－弾性率）より岩石の値（読み取り値）とした。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊じん性－弾性率）より岩石の値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献[Akiyama]の評価式より 298K の値を算出した。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献[状態図]の Fe-O 状態図を参照した。
(Zr,U)SiO ₄	密度	最小値は文献[CRC]より ZrSiO ₄ の値とした。最大値は式量に比例するとして USiO ₄ の式量と ZrSiO ₄ の値から算出した。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [H26]を参照した。
	弾性率	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊じん性－弾性率）より岩石の値（読み取り値）とした。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊じん性－弾性率）より岩石の値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献値[CRC]より 100°Cの ZrSiO ₄ の値とした。
	比熱	ZrSiO ₄ を最大値、USiO ₄ を最小値としてデュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	Web サイト[TDnucl]の SiO ₂ -ZrO ₂ 擬二元系状態図より 1900K で分解するものとした。

各暫定値の設定根拠（マイクロ性状表） #4

化合物/相	物性	設定根拠
UO ₄ ・4H ₂ O	密度	UO ₄ ・4H ₂ O として Web サイト[Webmineral]のシュトゥット石（Studtite）の情報を参照した。
	硬さ	シュトゥット石のモース硬度[Wikipedia]と web サイト[iStone]のモース硬度計とビッカース硬度計の比較より推定した。
	弾性率	文献値[Weck]の計算値を参照した。
	じん性	シュトゥット石のモース硬度[Wikipedia]を参考に石膏と同等と仮定し、文献値[Tsuji]を参照した。
	熱伝導率	UO ₂ と同等と仮定した。
	比熱	UO ₄ ・4H ₂ O としてデュロン・プティの法則およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献[Boggs]および JAEA 成果[H25]より、脱水、分解するものとした。
Zry-2	密度	Zr と同等とし、文献値[CRC]を参照した。
	硬さ	文献値[Whitmarsh]を参照した。
	弾性率	文献値[Whitmarsh]を参照した。
	じん性	Zr-2.5Nb と同等とし、文献[Ahn]の応力拡大係数を参照した。
	熱伝導率	Zr と同等とし、文献値[CRC]より 300K の値とした。
	比熱	Zr と同等とし、文献値[CRC]を参照した。
	融点	Zr と同等とし、文献値[ふるまい]を参照した。
α-Zr(O)	密度	これまでの当事業の成果 [H27]を参照した。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [H27]を参照した。
	弾性率	これまでの当事業の成果 [H27]を参照した。
	じん性	これまでの当事業の成果 [H27]を参照した。
	熱伝導率	Zr と同等とし、文献値[CRC]より 300K の値とした。
	比熱	Zr と同等とし、文献値[CRC]を参照した。
	融点	文献[状態図]の O-Zr 状態図を参照した。

各暫定値の設定根拠（マイクロ性状表） #5

化合物/相	物性	設定根拠
SUS/Fe	密度	文献値[CRC]を参照した。
	硬さ	文献[CRC]の Fe およびステンレス系材料の硬さデータおよび当事業の成果[H27]を参照した。
	弾性率	文献[CRC]より練鋼のデータより設定した。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊靱性－弾性率）より鋼の値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献値[CRC]より 300K の値とした。
	比熱	文献値[CRC]を参照した。
	融点	文献[Perrys]を参照した。
Fe ₂ Zr	密度	これまでの当事業の成果 [H26]を参照した。
	硬さ	文献値[Keitz]およびこれまでの当事業の成果 [H26]を参照した。
	弾性率	これまでの当事業の成果 [H26]を参照した。
	じん性	これまでの当事業の成果 [H26]を参照した。
	熱伝導率	Fe と同等と仮定した。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献[状態図]の Fe-Zr 状態図を参照した。
B ₄ C	密度	文献値[CRC]を参照した。
	硬さ	文献値[CRC]を参照した。
	弾性率	文献値[CRC]を参照した。
	じん性	SiC と同程度と仮定し、文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊靱性－弾性率）より SiC の値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献値[CRC]を参照した。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献[Perrys]を参照した。

各暫定値の設定根拠（マイクロ性状表） #6

化合物/相	物性	設定根拠
ZrB ₂	密度	文献値[CRC]を参照した。
	硬さ	文献値[CRC]およびこれまでの当事業の成果 [Takano]を参照した。
	弾性率	文献値[CRC]を参照した。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊靱性－弾性率）より工業用セラミックスの値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	文献値[CRC]を参照した。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献値[CRC]を参照した。
Fe ₂ B	密度	資料[BodyCoat]を参照した。
	硬さ	これまでの当事業の成果 [Takano]を参照した。
	弾性率	文献値[CRC]を参照した。
	じん性	文献[Ashby]の材料物性チャート（破壊靱性－弾性率）より工業用セラミックスの値（読み取り値）とした。
	熱伝導率	ZrB ₂ と同等と仮定した。
	比熱	デュロン・プティの法則（※2）およびノイマン・コップの法則（※3）、原子量（2013）より算出した。
	融点	文献[状態図]の B-Fe 状態図を参照した。

※1 ベガード則：合金の格子定数と組成元素の濃度におおよその比例関係が成り立つ。

※2 デュロン・プティの法則：固体元素の定積モル比熱はほぼ等しく、近似的に $C_v=3R$ で表される（Rは気体定数）。

※3 ノイマン・コップの法則：固体化合物のモル比熱は成分元素の原子熱の和で近似できる。

参考文献リスト（ミクロ性状表） #1

- Ahn: Sangbok AHN, Dosik KIM, Daeseo KOO, Sangchul KWON, Yongsuk KIM " The Fracture Toughness Testing of Unirradiated and Irradiated Zr-2.5Nb CANDU Pressure Tube", JAERI-Conf 99-009 (1999) 255-266
- Akiyama 秋山 友宏、小倉 岳、太田 弘道、高橋 礼二郎、早稲田 嘉夫、八木 順一郎、「緻密な酸化鉄成形体の熱伝導率」、鉄と鋼、第 77 年（1991）第 2 号 45-49
- Ashby : 金子 純一、大塚 正久 訳「M.F. Ashby 機械設計のための材料選定」（1997）
- BodyCoat: ボディーコート・ジャパン株式会社「実用ボロナイジング処理及び最近のホウ化技術的進展」<http://www.bodycote.co.jp/pdf/Boronizing.pdf>
- Boggs: James E. Boggs, Munzir El-Chehabi, "The Thermal Decomposition of Uranium Peroxide, $UO_4 \cdot 2H_2O$ ", Journal of American Chemical Society, 79, 16 (1957) 4258-4260
- Ceram: Web サイト セラミックス加工 <http://ceramics.s-projects.net>
- Cohen: I. Cohen and B. E. Schaner, "A Metallographic and X-ray Study of the UO_2 - ZrO_2 system", Journal of Nuclear Materials, 9, No.1 (1963) 18-52
- CRC: James F. Shackelford and William Alexander (Ed.) "Materials Science and Engineering Handbook 3rd Edition", Boca Raton, CRC Press LLC (2001)
- H24: 鷲谷 忠博、他、「東京電力福島第一原子力発電所における燃料デブリ特性把握・処置技術開発—平成 24 年度研究開発成果報告書—」, JAEA-Review 2013-066
- H25: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、「経済産業省委託事業 平成 25 年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業（燃料デブリ性状把握・処置技術の開発）報告書」（2014）
- H26: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 他、「平成 25 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ性状把握・処置技術の開発 研究報告書」（2015）
- H27: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 他、「平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリの性状把握 研究報告書（中間報告）」（2016）
- H29: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 他、「平成 28 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリの性状把握・分析技術の開発 研究報告書（中間報告）」（2018）
- H30: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 他、「平成 28 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリの性状把握・分析技術の開発 研究報告書（最終報告）」（2019）
- Hoshino: Takanori Hoshino, Toru Kitagaki, Kimihiko Yano, Nobuo Okamura, Hiroshi Ohara, Tetsuo Fukasawa, Kenji Koizumi, "Mechanical Properties of Fuel Debris for Defueling Toward Decommissioning", Proceedings of 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICON 23), May 17-21, 2015, Chiba, Japan
- iStone: 鉱物と隕石と地球深部の石の博物館, <http://www.istone.org/>
- Kato: Masato Kato, Teppei Uchida, Shun Hirooka, Masatoshi Akashi, Akira Komeno and Kyoichi Morimoto, "Melting Temperatures and Thermal Conductivities of Corium Prepared from UO_2 and Zircaloy-2", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1444, A41 (2012)
- Keitz: Keitz AV, Sauthoff G. "Laves phases for high temperatures—Part II: stability and mechanical properties. Intermetallics." 2002;10:497–510 (2002)
- Martin: U. Martin, H. Boysen, and F. Frey, "Neutron powder investigation of tetragonal and cubic stabilized zirconia, TZP and CSZ, at temperatures up to 1400 K", Acta Crystallographica B, 49, 403 (1993).

参考文献リスト（ミクロ性状表） #2

- Perrys: Don W. Green, Robert H. Perry, (Ed.) "Perry's Chemical Engineers' Handbook 8th Edition", McGraw-Hill, (2008)
- Shinkai: N. Shinkai, R. C. Bradt, and G.E. Rindone, "Fracture Toughness of Fused SiO₂ and Float Glass at Elevated Temperatures", Journal of the American Ceramic Society, Vol.64, No.7 (1981) pp.426-430
- Takano: Masahide Takano, Tsuyoshi Nishi, Noriko Shirasu, "Characterization of solidified melt among materials of UO₂ fuel and B4C control blade", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.51 [7-8](2014) 859-875
- TDnucl: TDnucl - Thermodata Nuclear Phase Diagrams, http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/TDnucl/TDnucl_Figs.htm
- Toishi: 「砥石」と「研削・研磨」の総合情報サイト。www.toishi.info, <http://www.toishi.info/>
- Tsuji: 辻 毅一、高田 朋典、長谷川 正木、「セッコウおよびポリマー・セッコウ複合体における破壊じん性値の切欠先端半径依存性」、無機マテリアル学会誌、Vol.8, (2001) 333-338
- Webmineral: Mineralogy Database, <http://webmineral.com/>
- Weck: Phillippe F. Weck, Eunja Kim and Edgar C. Buck, "On the Mechanical Stability of Uranyl Peroxide Hydrate: Implications for Nuclear Fuel Degradation", RSC Advance, 5 (2015) 79090-79097
- Whitmarsh: C. L. Whitmarsh, "Review of Zircalloy-2 and Zircalloy-4 Properties Relevant to N.S. Savannah Reactor Design", ORNL-3281 (1962)
- Wikipedia: フリー百科事典 ウィキペディア, <https://www.wikipedia.org/>
- Wright: Thomas R. Wright, Donald E. Kizer, Donald L. Keller, "Studies in the UO₂-ZrO₂ System", BMI-1689 (1964)
- Yamada: Kazuhiro Yamada, Shinsuke Yamanaka, Masahiro Katsura, "Mechanical Properties of (U,Ce)O₂", Journal of Alloys and Compounds 271-273 (1998) 697-701
- Yano: 矢野 公彦、鍛冶 直也、鷲谷 忠博、齋木 洋平、垣内 一雄、金岡 拓哉、牟田 浩明、山中 伸介、「ウラニア・ジルコニア固溶体の機械的性質に対する O/M 影響評価」 日本原子力学会 2013 年秋の大会, L32 (2013)
- ふるまい: 実務テキストシリーズ No.3 軽水炉燃料のふるまい (改訂第 5 版), 原子力安全研究協会, (2013)
- 状態図: 長崎 誠三、平林 眞 編著 「二元合金状態図集」 アグネ技術センター, (2001)