

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：32604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02647

研究課題名(和文) 微生物による燃料デブリの劣化溶解促進作用の解明研究

研究課題名(英文) Study of acceleration effects of microorganisms on fuel debris degradation

研究代表者

大貫 敏彦 (Ohnuki, Toshihiko)

大妻女子大学・人間生活文化研究所・特別研究員

研究者番号：20354904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終目的である1F環境下における燃料デブリの劣化機構を明らかにするため、Fe、CeO₂、ZrO₂及SiO₂の粉末試料、及び粉末を溶融・固化した燃料デブリ類似物(FDA)を作製し、常在菌や鉄溶解有機物排出微生物(SB)と接触させて、元素の溶解挙動や二次鉱物生成を分析した。その結果、Fe金属相が優先的に酸化溶解など、SBはFe溶解に関して常在菌よりも加速させることを明らかにした。さらに、Feの酸化溶解だけでなく、Uも酸化溶解することを明らかにした。これらの結果から、燃料デブリが微生物と接触することにより、Fe金属相だけでなく、Zr酸化物及びU酸化物も溶解する可能性を明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島第一原子力発電所の廃止措置では、燃料デブリを取り出す作業を円滑に進めていかねばならない。燃料デブリは、生物的要因についてはほとんど研究が行われていない。本研究では、燃料デブリが微生物と接触することにより、Fe金属相だけでなく、Zr酸化物及びU酸化物も溶解する可能性を明らかにできた。これらの結果は、燃料デブリのマトリックスがFe等を含む領域から優先的に劣化する恐れがあり、微生物により冷却水中に溶出する可能性を示している。デブリの取り出し時期が遅れることによる、デブリの劣化や、取り出し作業時間の長期化に伴い、劣化が進む懸念があることを示した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the degradation mechanism of fuel debris, powder samples of Fe, CeO₂, ZrO₂, and SiO₂, and fuel debris analogues (FDA) made by melting and solidifying the powders were prepared. FDA were in contact with ubiquitous bacteria and siderophore emitting microbes (SB). The dissolution behavior of elements and secondary minerals were analyzed. The results showed that Fe metallic phase was preferentially oxidized and dissolved, and precipitated as trivalent Fe oxyhydroxide, indicating that SB accelerates Fe dissolution more than ubiquitous bacteria. Contact experiments with Zr oxide and SB revealed that SB could dissolve Zr oxide, and FDA with Fe, UO₂, and ZrO₂ was prepared and contacted with ubiquitous bacteria, which revealed not only oxidative dissolution of Fe, but also U. These results revealed the possibility that fuel debris could dissolve not only Fe metallic phase but also Zr oxide and U oxide by contact with microorganisms.

研究分野：原子力工学

キーワード：福島第一原子力発電所 廃炉 Degradation 微生物 シデロフォア

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所(1F)の廃炉ではシビアアクシデントを経験した原子炉の廃止措置という極めて特殊な環境下で、燃料デブリを取り出す作業を円滑に進めていかねばならない。燃料デブリの取出し時期は、令和3年以降と想定されており、燃料デブリ生成後10年経過後となる予定であった。さらに、その後の燃料デブリ取り出しは長期間を要すると予想され、燃料デブリは炉内環境中で十年以上留まることとなる。燃料デブリの取り出しには、デブリを切削し、回収したのち長期間保管する必要がある。

燃料デブリは、環境中、特に酸素を含む雰囲気下では、温度変化、地下水のpH、酸素濃度や放射線の影響、及び微生物活動により一部が損傷し性状が変化する可能性が高い。すなわち、物理的要因、化学的要因、生物的要因及び放射線要因により燃料デブリの性状が変化する。物理的要因、化学的要因及び放射線要因については公募研究などにより原子力損害賠償・廃炉等支援機構などを中心にして進めている。しかし、生物的要因についてはほとんど研究が行われていない。

一方、米国ではスリーマイル原子力発電所事故(TMI)あるいはチェルノブイリにおいて微生物の活動が報告されている。チェルノブイリ原子力発電所では、事故で生成したウランなどを含むデブリをコンクリートで固めたいわゆる象の足がある。炉心から漏出したデブリをコンクリート固めたもので、当初は射撃でも変化が見られないような堅固のものが15年後には形をなさないうまで、風化した。この風化には微生物関与の可能性が示された(Krasinov、私信)。

これらの結果は、燃料デブリが微生物により劣化し、最悪の場合には劣化デブリがサブプレッションプールまで拡がる可能性があることを示している。このような事態になれば、燃料デブリの取り出し計画の見直しが必要となる可能性が高い。したがって、微生物による燃料デブリの劣化について早急に研究すべきである。さらに、対象とすべき微生物は *Deinococcus radiodurans* のような放射線耐性菌だけではないことを示している。これまで、微生物による燃料デブリの劣化に関する研究が行われていなかった最大の理由は、U などアクチノイドを含む燃料デブリと微生物との相互作用を解明できる知見を有する研究者が関与していなかったためである。

燃料デブリは炉心溶融事故により燃料物質を含んだ溶融あるいは未溶融のたい積物の総称であり、様々な形態で固化している。1Fにおいては溶融した燃料と格納容器床面のコンクリートとの反応(MCCI)が発生し、 UO_2 、ジルカロイ(Zry)、ステンレス鋼(SS)などの炉心材料が溶けてコンクリート成分との混合物(MCCI生成物)が生成している。模擬的に作製したMCCI生成物の断面を電子顕微鏡で観察して、元素組成分析を行った結果から、Uを含むや炉心材料の溶解物がSi及びAl組成のマトリックスの中に散在していることが分かる。シリカは、微生物(*Pseudomonas* sp.等)により溶解することが知られている。微生物による溶解性は、 UO_2 や ZrO_2 に比べて大きい、と考えられる。*Pseudomonas* sp.等による溶解により、MCCI生成物のマトリックス構造物が溶け出し、UやZrが地下水と直接接触し、イオンあるいは粒子として漏出する可能性が高い。したがって、MCCI生成物を対象として *Pseudomonas* sp.等の微生物による劣化機構を解明することが重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、1F環境下における燃料デブリの一つであるMCCI生成物を対象として、マトリックス構造の損傷及びUやZrの漏出への微生物の影響を調べる試験的研究を行い、MCCI生成物の劣化機構を明らかにすることを最終目的とする。具体的には、i) Fe、 CeO_2 、 ZrO_2 などの粉末試料、及び粉末を溶融・固化した模擬MCCI生成物を微生物培養液中に添加してマトリックスの劣化を調べ、微生物により劣化し易いマトリックスを調べる。ii) マトリックスの劣化によるUなどのアクチノイドのイオンあるいは粒子として漏出挙動を調べる。iii) 電子顕微鏡、放射光分析によりマトリックス構造の変化や損傷の程度及び元素の化学状態を調べる。結果に基づき、iv) 微生物によるMCCI生成物のマトリックスの劣化プロセス及びUやZrの溶出プロセスを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の最終目的である1F環境下における燃料デブリの一つであるMCCI生成物の劣化機構を明らかにするため、以下の方法で研究を進めた。

i) Fe、 CeO_2 、 ZrO_2 及び SiO_2 の粉末試料、及び粉末を溶融・固化した燃料デブリ類似物(FDA)を作製する。

ii) FDAを常在菌や鉄溶解有機物排出微生物と接触させて、それぞれの元素の溶解挙動や二次鉱物生成を、溶液分析及びSEM-EDXにより分析する。

iii) Fe、 UO_2 、 ZrO_2 を用いたFDAを作製し、常在菌と接触させて、それぞれの元素の溶解挙動や二次鉱物生成を、溶液分析及びSEM-EDXにより分析する。

iv) これらの結果をまとめてFDAの劣化プロセス及びUやZrの溶出プロセスを明らかにする。

4. 研究成果

4.1 シュードモナス及びバチルス菌によるFe、 Si_2 、 $(Ce,Zr)O_2$ 系の溶解

まず、一般環境に生息する常在菌であるバチルス菌及びシュードモナス菌を用いて、燃料デブリの組成である酸化物として $(\text{Ce}, \text{Zr})\text{O}_2$ (Uの代替としてCeを用いた)粉末を用いて、金属相としてFeの粉末を用いて溶解試験を行った[1,2]。実験では、燃料デブリ模擬 (FDS1) として、 $(\text{Ce}, \text{Zr})\text{O}_2$ 粉末とFe粉末を一定の割合で混合させた試料を用いた。シュードモナス菌 (*Pseudomonas fluorescens*) 及びバチルス菌 (*Bacillus subtilis*) に最小限の栄養を供給する基礎液体培地においてバチルス菌を前培養した後、FDS1 粉末試料を添加した。基礎液体培地は、超純水に 10 g/L グルコース、1.0 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0.2 g/L KCl, 0.2 g/L MgSO_4 , 0.1 g/L K_2HPO_4 を溶解させた (Vasanthi et al., 2018)。

バチルス菌の培養中には、実験条件によって液相が異なる色を呈した (Fig. 1)。FDS1 粉末試料をバチルス菌を含まない超純水に浸した場合 (Exp.No.1) 20 日間まで培地の色の变化は見られなかった (Fig. 1a)。FDS 粉末試料を基礎培地に浸した場合、菌の有無とは無関係に、最終的に液相の色は茶色に変化した (Fig. 1b、c、d)。菌を含む基礎培地 (Fig. 1c および d) の色変化は、菌を含まない基礎培地 (Fig. 1b) の色変化より早い時間に現れた。基礎培地の茶色への色の变化が観察されたことは、Fe(0) 粉末の一部が溶解し、Fe(III) に酸化されたことを示す。

液相の pH の変化は、菌の存在の有無によって異なった。菌が存在しない場合は pH の変化が緩やかであったが、菌が存在する場合は 1 日後に pH が急激に低下し、3 日後には 5.6-5.8 へと急激に低下した。この急減は菌がブドウ糖を消費して生成する有機酸によるものと考えられる。pH の減少に伴う Fe の溶解を調べるため、最低 pH である pH3.43 の規定培地溶液を用いて Fe の溶解を試験した。pH3.43 の基礎培地から検出された Fe は 20 d で約 2.4% であり、菌を加えた系の 10 分の 1 以下であり、菌による Fe の溶解が支配的であることを確認できた。

液相の Eh の変化は、菌の有無により異なり、菌が存在しない場合、実験初期 (1-3d) に液相の Eh が急激に減少した。水中での Eh 低下は、FDS 粉末試料の Fe(0) の酸化に起因すると考えられる。基礎培地での Eh 低下は水よりも大きく、これはグルコースによるものである。菌が存在する場合には、Eh は 3d まで上昇し、10d で初期 Eh と同様の値まで低下したことから、菌が酸化的雰囲気を持していることがわかった。10 日後、すべての実験において Eh はほとんど変化しなかった。

実験期間中、Zr は液相に検出されず、液相に検出された Ce と Si は、それぞれ初期 FDS サンプルの Ce の 1×10^{-3} % 以下、Si の約 1 % に相当し、菌による $\text{CeO}_2/\text{ZrO}_2$ および SiO_2 の溶解促進は確認できなかった。Fig. 2 は、液相で検出された Fe の見かけの割合を示す。液相が褐色であること (Fig. 1b、c、d) から、液相中の Fe の一部は、弱酸性からアルカリ性までの pH 条件下で沈殿しやすい Fe(III) であり、したがって、溶解 Fe の真値の割合は、Fig. 2 に示した割合と沈殿した Fe の割合の和である。細菌が存在しない場合、液相で検出される Fe は 0.3% 以下であった。*P. fluorescens* が存在する場合、検出される Fe の割合は時間の経過とともに著しく増加し、20 d 後には 30% 以上の Fe が液相に検出された。液相で検出された Fe のうち、約 17 % (10 d) および 29 % (20 d) が Fe^{2+} であった[3]。

FDS1 を含む沈殿固相の色の観察結果から、FDS1 の元の色は灰色であったが、菌が存在しない場合には、接触後 10 d はほとんど変化せず、その後濃い灰色に変化した。この色の变化は、FDS1 の表面に 2 価の Fe0 が形成され、Fe(III) 化合物が生成される可能性が低いと考えられる。菌を含まない基礎培地及び菌が存在する場合には、10 d で色が暗褐色に変化し、Fe(0) が Fe(III) に酸化されたことが示された。これらの結果は、液相の色調変化とよく一致していた。

FDS1 粉末を含む沈殿物の SEM 画像から、初期の FDS1 試料と比較して、基礎培地中の *P. fluorescens* 細胞に 20 日間曝露した後の試料は、多くの微粒子を含んでいた。さらに、ナノサイズの鉄粒子が確認された。この結果は、FDS1 から溶解した Fe が酸化され、ナノサイズの鉄酸化物粒子として沈殿したため、Fig. 2 に示した Fe の割合よりも、溶解した Fe の割合が高くなったと考えられる。

固相の PXRD プロファイルから、細菌を含まない基礎培地に FDS1 を浸漬した場合、20 日後の

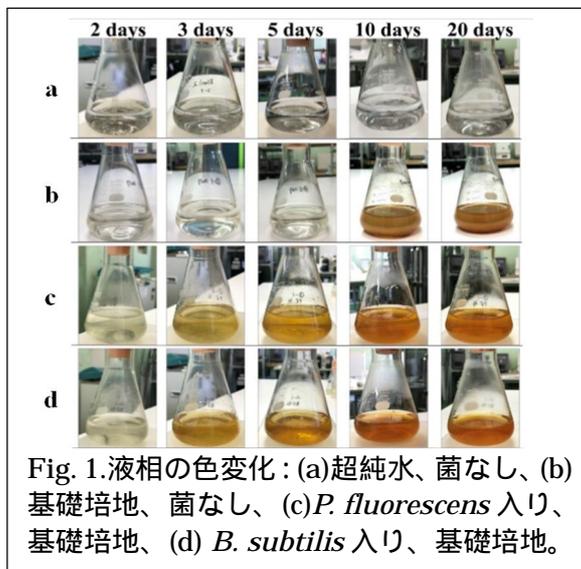


Fig. 1. 液相の色変化: (a)超純水、菌なし、(b)基礎培地、菌なし、(c)*P. fluorescens* 入り、基礎培地、(d) *B. subtilis* 入り、基礎培地。

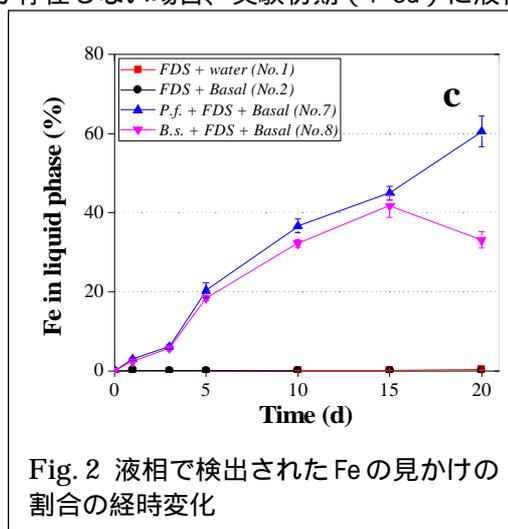


Fig. 2 液相で検出された Fe の見かけの割合の経時変化

試料には初期 3 成分の回折ピークが全て観察された。また、FeO と $-FeOOH$ の回折ピークが観察された。また、*P. fluorescens* を含む基底培地に 20 日間浸漬した後に採取した固相にも初期 3 成分が残存し、他の回折ピークは観察されなかった。*B. subtilis* を用いた 20 日間の実験後に採取した固相についても、同様の結果が得られた。バクテリアに暴露された固相と暴露されていない固相の主な違いは、結晶性の FeO と $-FeOOH$ の存在である。菌を含む基底培地に 20 日間曝露した後の固相の色は茶色であった。この結果から、茶色の相はアモルファス Fe(III) 水酸化物 / 酸化物であることが示唆された。

液体培地中に懸濁した *P. fluorescens* と *B. subtilis* の細胞濃度 (CFU) を示したものである。FDS1 を添加しない対照実験および FDS1-noFe を添加した実験では、被験菌の細胞濃度は実験 3 日目までほとんど変化せず、その後 20 日目まで指数関数的に減少し続けた。この結果は、*P. fluorescens* と *B. subtilis* が FDS1 中の Fe(0) を利用して増殖していることを示唆している。液体基礎培地中の P の濃度から、細菌が存在しない 20d まではほとんど変化しなかったが、菌が存在する場合、P の濃度は、それぞれ 10d と 5d まで時間の経過とともに減少した。この結果は、リン酸イオンが細菌の増殖のために消費されたことを示す。SEM EDX 観測から、FDS1 粉末を含む沈殿物には、リン酸塩の一部が吸着していた。

4.2 シデロフォア排出菌を用いた Fe, (Ce,Zr) $_2$ O $_3$ 系の溶解

4.1 で述べたように、FDS では Fe 相の溶解が促進される。そこで、Fe(III) の溶解を促進させるシデロフォアを高濃度で排出するシデロフォア排出菌 (以下、SB) を用いて、燃料デブリの組成である酸化物として CeO $_2$ 粉末、ZrO $_2$ 粉末、SiO $_2$ 粉末、金属相として Fe 粉末を用いて溶解試験を行った [3-5]。実験では、CeO $_2$ 粉末、ZrO $_2$ 粉末、Fe 粉末と、CeO $_2$ 粉末 + Fe 粉末混合粉末、ZrO $_2$ 粉末 + Fe 粉末混合粉末、SiO $_2$ 粉末 + Fe 粉末混合粉末、SiO $_2$ 粉末 + ZrO $_2$ 粉末 + CeO $_2$ 粉末 + Fe 粉末混合粉末、試料を用いた。実験では、10 倍希釈した Luria-Bertani (LB) 培地 (yeast extract, 5 g/l; peptone, 5 g/L; NaCl, 10 g/L) を添加した寒天培地を用いて、寒天上にフィルターをセットして BS を 30 °C で 2 日間前培養した。前培養により形成された SB 細胞コロニー上に、各粉末を少量添加して、50 日間培養した。

SB 菌と接触した各粉末試料の中で、CeO $_2$ 粉末だけはほとんど変化が見られなかった。一方、Fe を含む混合粉末では、バチルス菌などの結果と同じように Fe 相において、Fe の酸化溶解が促進されている結果が得られた。SiO $_2$ 粉末 + ZrO $_2$ 粉末 + CeO $_2$ 粉末 + Fe 粉末混合粉末の SEM 像及び EDX による Fe 及び O のマッピングから、酸化物及び Fe 金属相に微生物細胞が認められた (SEM 像)。元素マッピングからは、Fe の強度が高い領域において O の強度も高いことから、金属 Fe が酸化されて沈殿していることが分かる。Si, Zr 及び Ce については、溶解の有無については判断できなかった。

そこで、CeO $_2$ 粉末、ZrO $_2$ 粉末、SiO $_2$ 粉末を単独で SB 細胞に接触させた。その結果、CeO $_2$ 粉末及び SiO $_2$ 粉末では、ほとんど変化が見られなかったが、ZrO $_2$ 粉末試料では表面に二次鉱物と判断できる沈殿物が検出された。この結果から、SB は Fe だけでなく、ZrO $_2$ 粉末も溶解する可能性があることが示された。

4.3 Fe, (U,Zr) $_2$ O $_3$ 系の溶解

U を含む系での実験では、燃料デブリ模擬として、(U,Zr) $_2$ O $_3$ 粉末と Fe 粉末を一定の割合で混合させた試料 (FDS2) 及び両者を溶かして作成したペレット試料、それに UO $_2$ 粉末及び Fe(0) 粉末試料を用いた。シュードモナス菌 (*Pseudomonas fluorescens*) 及びバチルス菌 (*Bacillus subtilis*) に最小限の栄養を供給する基礎液体培地においてバチルス菌を前培養した後、FDS2 粉末試料あるいはペレット試料を添加した。

Fig. 3 は、ペレット試料を用いた場合の液相中の U と Fe の濃度の時間経過を示したものである。これらの濃度はそれぞれ、液相にさらされた U $_0.5$ Zr $_{0.5}$ O $_2$ および Fe(0) の表面積で規格化した。Zr は液相では検出されなかった。FDS2 が *B. subtilis* 細胞と接触した場合の液相中の U および Fe の規格化濃度は、FDS2 が *B. subtilis* 細胞と接触していない場合よりも大きく、菌の活動が U および Fe の溶解を促進したことを示していた。U と Fe の規格化濃度は、時間の経過とともに急峻に上昇したが、7 日以降の上昇は緩やかであった。

U $_0.5$ Zr $_{0.5}$ O $_2$ 相に *B. subtilis* の細胞は検出されたが、細胞数は Fe(0) 相のそれよりもはるかに少なかった。Fe(0) 相の表面は多くの細胞で覆われ、いくつかの凝集体も見られた。細菌を入れない対照実験では、Fe(0) 相は黒い層で覆われ、U $_0.5$ Zr $_{0.5}$ O $_2$ 相は大きく変化しなかった。

採取した沈殿物の SEM 画像と EDX スペクトルから、沈殿物は菌細胞とナノサイズの粒子の混合物であった。沈殿物からは U と Fe が検出されたことから、溶解した U と Fe の一部が沈殿したことがわかる。沈殿固化する経路としては、溶解した鉄が酸化鉄や水酸化物に沈殿すること、溶解した U と Fe が共沈すること、沈殿した酸化鉄や水酸化物に溶解した U が吸着すること、細菌細胞に溶解した U や Fe が吸着することが考えられる。

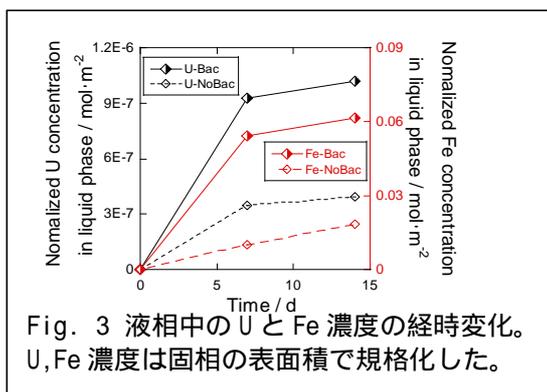


Fig. 3 液相中の U と Fe 濃度の経時変化。U, Fe 濃度は固相の表面積で規格化した。

UO₂およびFe(0)の粉末を用いて前培養溶液を1 mL加えた実験(UF-1Mと表す)の液相は12日で薄黄色になり、Fe(0)粉末の一部が腐食してFe(III)が液相に浮遊または溶解していることがわかった。UO₂を用いた他の実験(U-0M、U-1M、U-20M、UF-0M)の液相の色は変化しなかった。

液相中のUおよびFeの量を、粉末試料中の初期量に対するパーセント分率で表した時間経過から、*B. subtilis*が存在しない場合、液相中のUはほとんど検出されなかったが、*B. subtilis*が存在する場合には、液相中のUの割合が増加した。同様に、*B. subtilis*が存在する場合は、*B. subtilis*が存在しない場合に比べ、Feの割合が大きくなることがわかった。同様の結果は、Uを用いない実験でも得られており、*B. subtilis*を含む基底培地にFe(0)粉末を曝露すると液相中のFe濃度が上昇し、*B. subtilis*を含まない基底培地にFe(0)粉末を曝露しないと液相中にFeがほとんど存在しないことがわかった。

溶液のpHが元素の溶解挙動に影響を与える重要な因子であることは広く認められている。枯草菌が存在しない場合(U-0M、UF-0M)には液相のpHはほとんど変化しなかったが、枯草菌が存在する場合(U-1M、U-20M、UF-1M、F-1M)は液相のpHが時間とともに変化し、5~10日の間に約4までpHが下がった。一般的に液相のpHは細菌に糖を消費されて低下すると考えられています。我々はさらにpHの影響を調査した。U-1Mの対照実験は枯草菌を用いず、基底培地のpHを4.0に固定した。このpH値は、U-1M実験の最低pHに近い値であった。このコントロール実験の液相中のUの最大分率は $0.08 \pm 0.01\%$ であり、U-1M実験のUの分率は $0.12 \pm 0.06\%$ であった。これらの結果から、溶液pHがUO₂からのUの溶解に関与しているかどうかはわからない。しかし、最低pHが 4.6 ± 0.1 と高いU-20M実験では、より大きな割合(約1.3%)のUが液相に検出された。このU-20M実験の初期バクテリア細胞濃度は、U-1M実験のそれよりも20倍高かった。したがって、溶液のpHはUO₂からUを溶出させる主な要因ではない。

UとFeの相互影響を調べるために、UO₂粉末とFe(0)粉末からなるアナログを用いたUF-1M実験を行った。UF-1M実験のUとFeの最大分率は、U-1M実験のUとF-1M実験のFeの分率より小さい。Uの割合の減少は、Feの割合の減少よりも大きいようである[6-8]。

4.4 まとめ

本研究の最終目的である1F環境下における燃料デブリの一つであるMCCI生成物の劣化機構を明らかにするため、研究を進めた。

Fe、CeO₂、ZrO₂及SiO₂の粉末試料、及び粉末を溶融・固化した燃料デブリ類似物(FDA)を作製し、常在菌や鉄溶解有機物排出微生物(SB)と接触させて、それぞれの元素の溶解挙動や二次鉱物生成を、溶液分析及びSEM-EDXにより分析した。その結果、Fe金属相が優先的に酸化溶解して、3価Fe酸化水酸化物として沈殿した。SBはFe溶解に関して常在菌よりも加速させることを明らかにした。また、Zr酸化物とSBとの接触実験により、SBがZr酸化物を溶解する可能性のあることを明らかにした。

Fe、UO₂、ZrO₂を用いたFDAを作製し、常在菌と接触させて、Feの酸化溶解だけでなく、Uも酸化溶解することを明らかにした。

これらの結果から、燃料デブリが微生物と接触することにより、Fe金属相だけでなく、Zr酸化物及びU酸化物も溶解する可能性を明らかにできた。

[1] 劉江、他、常在細菌による模擬燃料デブリの溶解、2022年放射化学学会年会、2022年9月、東京。

[2] J. Liu, et al., Potential bacterial alteration of nuclear fuel debris: a preliminary study using simulants in powder and pellet forms, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2022, 331, pages2785-2794 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08324-y>.

[3] 大貫敏彦、微生物機能と福島第一原子力発電所の燃料デブリ、日本原子力学会誌, Vol.64, No.12 (2022)

[4] T. Ohnuki, et al., Microbial acceleration of degradation of nuclear fuel debris, An experimental study on the degradation of UO₂/Fe(0) by bacteria, FDR2022, 2022, 9月(双葉、福島)

[5] T. Ohnuki, et al., Degradation of nuclear fuel debris analogue by siderophore-releasing microorganism, J. Nuclear Science & Tech., accepted for publication. DOI: https://doi.org/10.3327/jaesjb.64.12_670

[6] 土津田 雄馬、大貫 敏彦、地下水中の微生物群と燃料デブリ模擬物の反応に関する検討、本原子力学会誌, Vol.65 4号 p. 243-247

DOI: https://doi.org/10.3327/jaesjb.65.4_243

[7] Jiang Liu, Yuma Dotsuta, Takehiro Sumita, Toru Kitagaki, Toshihiko Ohnuki, Naofumi Kozai, An experimental study on the degradation of UO₂/Fe(0) by bacteria, FDR2022, 2022, 9月(双葉、福島)

[8] Jiang Liu, 他, Alteration of fuel debris simulants by *Bacillus subtilis*, in print 2023, Journal of Nuclear Science and Technology, DOI: 10.1080/00223131.2022.2162995

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Liu Jiang、Dotsuta Yuma、Sumita Takehiro、Kitagaki Toru、Ohnuki Toshihiko、Kozai Naofumi	4. 巻 331
2. 論文標題 Potential bacterial alteration of nuclear fuel debris: a preliminary study using simulants in powder and pellet forms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 2785～2794
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-022-08324-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Dotsuta Yuma、Ohnuki Toshihiko	4. 巻 65
2. 論文標題 Microorganisms around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and effects on Debris and Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Atomic Energy Society of Japan	6. 最初と最後の頁 243～247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3327/jaesjb.65.4_243	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Liu Jiang、Dotsuta Yuma、Kitagaki Toru、Aoyagi Noboru、Mei Huiyang、Takano Masahide、Kozai Naofumi	4. 巻 65
2. 論文標題 Alteration of fuel debris simulants by Bacillus subtilis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1～11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2022.2162995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ohnuki Toshihiko	4. 巻 64
2. 論文標題 X-Treme microbes and Fukushima NPP decommissioning (2)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Atomic Energy Society of Japan	6. 最初と最後の頁 670～675
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3327/jaesjb.64.12_670	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Jiang Liu, Yuma Dotsuta, Takehiro Sumita, Toru Kitagaki, Toshihiko Ohnuki, Naofumi Kozai
2. 発表標題 An experimental study on the degradation of UO ₂ /Fe(0) by bacteria
3. 学会等名 International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research、FDR2022）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshihiko Ohnuki , Jiang Liu, Yuma Dotsuta, Toru Kitagaki, Takahiro Sumita, Masaaki Kobata, Yukihiro Satou, Naofumi Kozai
2. 発表標題 Microbial acceleration of degradation of nuclear fuel debris
3. 学会等名 International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research、FDR2022）（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大貫 敏彦、 Liu Jiang、土津田 雄馬、北垣 徹、中瀬 正彦
2. 発表標題 微生物による燃料デブリの溶解促進
3. 学会等名 2022年放射化学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土津田 雄馬、劉 江、北垣 徹、大貫 敏彦
2. 発表標題 福島第一原子力発電所周辺の微生物および放射線の微生物への影響
3. 学会等名 2022年放射化学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉 江、土津田 雄馬、北垣 徹、高野 公秀、香西 直文、大貫 敏彦
2. 発表標題 常在細菌による模擬燃料デブリの溶解
3. 学会等名 2022年放射化学会年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	劉 江 (Liu Jiang) (00839095)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター・博士研究員 (82110)	
研究分担者	宇都宮 聡 (Utsunomiya Satoshi) (40452792)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	高野 公秀 (Takano Masahide) (40501367)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・リーダー (82110)	
研究分担者	田中 万也 (Tanaka Kazuya) (60377992)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹 (82110)	
研究分担者	香西 直文 (Kozai Naofumi) (80354877)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主席 (82110)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	西口 規彦 (Nishiguchi Norihiko) (40175518)	北海道大学・工学研究院・特任教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関