

炉心溶融物とコンクリートとの相互作用による水素爆発，CO爆発の可能性

岡本良治
中西正之
三好永作

おかもと りょうじ
九州工業大学名誉教授(原子核物理学)
なかにし まさゆき
燃焼炉設計技術者
みよし えいさく
九州大学名誉教授(理論化学)

1 炉心溶融物とコンクリートとの反応をなぜ今とりあげるか

2013年7月8日に、原子力規制委員会(以下、規制委)による新規制基準が施行されて以来、電力会社による原発の再稼働申請がなされ、その審査がなされている。再稼働の是非については、各種世論調査によれば、反対意見が相対多数ではあるが、安全で必要ならば、という条件付きで再稼働を認めるという意見もある。本稿では、再稼働の必要性または不要性については言及せず、再稼働の安全性または危険性について論じる。

本稿執筆時点で筆者らが知る限り、炉心溶融物(コリウム)とコンクリートとの相互作用の影響についての記述は、一般市民の目に触れる形では、政府事故調報告書において数行¹、その技術解説²、国会事故調報告書において数ページの言及³、原子力安全基盤機構(以下、JNESと略称)⁴、および文献^{5,6}におけるわずかな言及があるのみで、福島第一原発事故以後に日本国内で出版された出版物について、この問題についての系統的な言及はない。そして、以下論じるシビアアクシデント(以下、過酷事故)を論じた文献⁷の中でも言及がない。残念ながら、国会事故調はその報告が国会において審議・活用されることなく、規則により活動を終えた。

公開された国内外の関連資料をもとに考える限り、以下説明するように、原発が再稼働された場合、コリウム・コンクリート相互作用の進行次第

では、原発立地自体の住民だけではなく、より広範な市民にも重大な影響を及ぼす恐れがある。再稼働への賛否を決めている人々だけではなく、まだ態度を決めかねている人々にも時期を逸することなく、まず知っていただきたいと考え、本稿を作成した次第である。

2 過酷事故とその研究の歴史

過酷事故とは何か。原子力関係者の間では原子炉設備において発生する事故は、設計事故(design-base accident, 以下、DBA)と設計外事故(beyond-design-base accident, 以下、B-DBA)と分類されてきた。前者は原子力設備を設計する際、対処のための自動機能を具備させる対象として予め考慮しておく事故のことである。たとえば、冷却材喪失事故(LOCA)はその代表的なもののひとつである。このような設計上の前提を超え、本来の自動機能だけでは対応できない事故がB-DBAであり、過酷事故(シビアアクシデント)とも称されている^{1,7,8}。自動機能だけでは対処できないとなると、後は人的な対応が必要で、その成否が事態を決する。過酷事故の中で最も代表的で、かつ炉心損傷に至る発生頻度の高いものとして長年警戒対象だったのが、福島第一原発事故で起きた全交流電源喪失(SBO)である。

2006年、衆議院において、巨大地震の発生に伴う安全機能の喪失など原発事故の危険から国民の安全を守ることに関する吉井英勝氏(前衆議院議員)の質問に対して、当時の安倍首相による国会答弁では「必要な電源が確保できず冷却機能が失

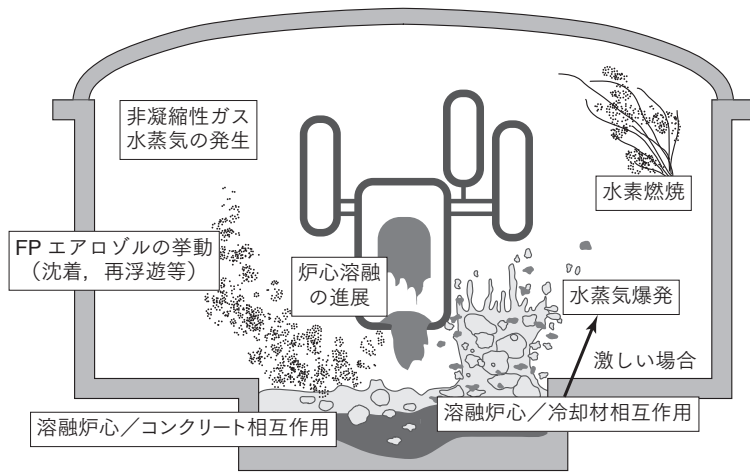


図1—シビアアクシデント時の原子炉格納容器内の主要な現象

[出典]日本原子力研究所：原子力安全性研究の現状，平成7年(1995年10月)，p. 38

われた事例」はいままでにないので，そんなテーマのことは考える必要はないといていた⁹。

原発は絶対安全という大量宣伝の一方で，他方では過酷事故の研究が国内でも1970年代から繰り返し行われていた。アメリカのサンディア国立研究所で開発されたソフトウェア(MELCOR 1.8.5)を用いて，原子力安全基盤機構により2009(平成21)年度地震時レベル2PSAの解析¹⁰とコリウム・コンクリート反応についての解析¹¹が行われていた。過酷事故時の原子炉格納容器内の主要な現象を図1¹²に示す。

福島第一原発事故の進展についても，細部はともかくシミュレーションで解析されていた¹³。過酷事故についてはアメリカでは過去に膨大な研究成果があった^{14~17}。ヨーロッパでも1990年代後半から過酷事故の研究は多数行われていた^{18~22}。

3 コリウム・コンクリート相互作用による水素，CO₂ および CO の発生

3.1 コリウム・コンクリート相互作用とは何か

コリウム(corium)とは核燃料(ウラン235, 238)，核分裂生成物，被覆管材料(ジルコニウム合金)，制御棒などを含む炉心溶融物のこと。主成分はUO₂，ZrO₂，Zr，Fe，Cr，Niであり，密度は6000~7000 kg/m³である²³。同様な組成のものを実験に用い

るときに，この模擬物もコリウムと呼ぶ。二酸化ウラン，酸化ジルコニウム，金属ジルコニウム等が主な成分である。または溶岩状燃料含有物質(LFCM, lava-like fuel containing material)とも呼ばれる²⁴。コリウム・コンクリート相互作用(corium-concrete interaction, CCI)とはコリウムとコンクリートの接触によるコリウムとコンクリート成分間の物理的変化，化学的変化のことで，溶融コア・コンクリート相互作用(molten core-concrete interaction, MCCI)ともいう。

3.2 想定外事象としての原子炉の溶融

原子炉(nuclear reactor)は第二次世界大戦中の米国マンハッタン計画において，長崎原爆の主材料であったプルトニウムを製造する装置であった。すなわち，ウラン238に中性子を照射し，2回のベータ崩壊を経由してプルトニウム239を製造する装置であった。英語では文字通り核反応装置であって，高温または超高温における複雑な物理的，化学的過程が含まれる炉(高温燃焼炉，溶融炉，smelting furnace)ではないことを強調したい。日本語の翻訳者の苦労または誤解が偲ばれるとともに，過酷事故の複雑な科学的過程と技術的に対処が困難であることの認識を曇らせてきたかもしれない。

耐火物業界においては，高温とは一般に1500℃以上を意味する。日本工業規格では温度の下

限を 1580℃ とし、これ以上の耐火度を有するものを耐火物と規定している²⁵。核燃料の二酸化ウランの融点は 2800℃ とされる。炉心溶融(melt-down)の際には 1500 K から 3000 K という高温状態が現れる²²。使用済燃料の崩壊熱による温度上昇の推定もこれらの高温状態の可能性を強く示唆している²⁶。したがって、原子炉の技術的な安全性または危険性を考察する上で、これらの高温状態における関連物質系の物理的性質および化学的性質の深い理解は必要不可欠であった。

3.3 コンクリートの構成要素

コンクリートは基本的にはセメントと水と骨材によってつくられる²⁷。骨材(aggregate)と呼ばれる岩石材料がコンクリートの体積の 70% から 80% を占めている。これらは砂や碎石などであって、形状・寸法以外はまったく手を加えることなく、素材として使われる²⁷。後に議論するように、このことが過酷事故対策に日本では予想されていなかった大きな問題を引き起こす可能性がある。

3.4 セメントの材料と製造過程

セメントは石灰岩(主成分は炭酸カルシウム, CaCO_3)であるが、1500℃ で焼成処理され、 CO_2 は分解、放出され、生石灰 CaO が生じる。しかし、次に述べるように、この逆反応はコンクリートが空気中の CO_2 を吸収して起こる白華現象として技術現場では観察されていた。

3.5 コンクリートが空気中の CO_2 を吸収する可能性

$\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$: 発熱反応(構成要素が共存すれば、自然に反応が進行)

現実に CO_2 との反応による白華現象として技術現場では観察されていた²⁷。コンクリートは大気中では不変の材料ではなく、早期に著しく脆弱な状態を引き起こすコンクリート劣化のシグナルが白華現象である²⁷。そうであるとすれば、1986年に過酷事故を起こしたチェルノブイリ原発のコンクリート製石棺の劣化も不可避であろう。

表 1—コンクリートの典型的な化学組成(重量 %) ¹⁵

酸化物	玄武岩系骨材のコンクリート	石灰岩系骨材のコンクリート
SiO_2	54.73	3.60
CaO	8.80	45.40
Al_2O_3	8.30	1.60
MgO	6.20	6.67
Fe_2O_3	6.25	1.20
K_2O	5.38	0.68
TiO_2	1.05	0.12
Na_2O	1.80	0.08
MnO	—	0.01
Cr_2O_3	—	0.004
H_2O	5.00	4.10
CO_2	1.50	35.70

3.6 玄武岩系骨材のコンクリートにおけるアルカリ骨材反応

骨材には玄武岩系と石灰岩系がある(表1)。1982年、全国規模でアルカリ骨材反応が発生していることが明らかになった²⁷。アルカリ骨材反応は、コンクリート中で、素材である岩石(骨材)中のシリカ(SiO_2)成分が強アルカリと反応して異常膨張やそれに伴うひび割れなどを引き起こす現象である。シリカは、石灰石を除く岩石中に 40% から 80% 含まれている、ごく一般的な鉱物である²⁷。シリカのアルカリ骨材反応によりコンクリートが崩壊することになる。このように、アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の早期劣化問題への対処が困難なために、石灰岩系の骨材がより多く使用されてきた²⁸。

3.7 高温におけるコンクリートからの H_2 , CO_2 と CO の発生

付録 1(稿未参照)に記すように、コンクリート内に含まれた水分と CaCO_3 の熱分解反応により CO_2 が 100~900℃ で放出される²³。コンクリートが加熱される場合の重要な化学反応を末尾の付録 1 に記す。特に、玄武岩系コンクリートからは主に水蒸気が放出され、石灰岩系コンクリートからはさらにはかなりの量の CO_2 が発生する²³。

表2—空気中における爆発限界，爆轟範囲と燃焼熱²⁷

	発火温度(°C)	爆発下限(%)	爆轟下限(%)	爆轟上限(%)	爆発上限(%)	燃焼熱 kJ/g
H ₂	500	4.0	18.3*	59.0	75.0	141.8(120)**
CO	651	12.5	15.0	70.0	74.0	10.1

* 爆轟の下限は 12.5% という研究もある。出典：日本原子力学会「シビアアクシデント熱流動現象評価」(2002年)。** 反応生成物が H₂O(g)の時，141.8 kJ/g，H₂O(L)の時，120 kJ/g。

原発事故において，H₂は燃料被覆管(および BWRの場合はチャンネルボックスも)の Zr の水蒸気との酸化反応(Zr-水反応)により発生するだけではなく，水の放射線分解によっても発生することが知られている。これらに加えて，有意の量の H₂が CCl の長期間にわたり生成される²²。すなわち，水蒸気や CO₂ とコリウム中の金属との酸化・還元反応により H₂ と CO ガスが発生する^{16, 21, 29}。

3.8 H₂, CO₂ と CO の物理的，化学的危険性

(1) H₂の化学的危険性：空気の比重を 1 とすれば，水素の比重は 0.07 と非常に軽いので発生したら，格納容器上部か，そこから漏れて原子炉建屋上部に移動する。表 2 に爆発限界を示す。爆発限界とは可燃性ガスと空気(窒素 78% + 酸素 21%)をどのような濃度に混合した時，爆発の危険がある状態のガスになるかということである。空気中に漏れた可燃性ガスの濃度がこの爆発限界の下限と上限の間にあると爆発の危険性がある。水素は爆発限界が非常に広い。熱と放射エネルギーを出す酸化反応の中で，反応速度が相対的に速い現象を燃焼という。化学反応速度が時間と共に限りなく増加する場合に爆発が起こる。爆発の中で，燃焼波の伝播速度が亜音速の場合に爆燃といい，超音速の場合に爆轟という(爆轟は破壊力が大きい)。表 2 のように，水素分布が均一の場合，爆轟範囲は 18.3% から 59% である。もし水素が格納容器内で一様に分布するのであれば，その集中は原理的には格納容器の健全性に対する脅威をもたらすには不十分であると見なされている²²。水素の分布は一般に均一ではなく，その集中が一様でなければ，爆轟または爆轟への移行の可能性がある^{22, 30}。これが水素濃度分布が重要である理由であり，実験のおよび理論的に強烈に研究されてきた理由で

表3—CO₂の熱分解によるCOの発生率³³

絶対温度	1500	2640	2879	2945	3116
乖離率(%)	0.04	21.0	51.7	64.7	76.1

もある。しかし，水素濃度の分布を決定する複雑な格納容器内現象を予言する解析コードの能力は成熟していない²²。

(2) CO₂の物理的危険性：水蒸気と異なり，非凝縮性のガスであり，大量に発生すると格納容器などの圧力容器の圧力を高め，格納容器の破壊の可能性を高める²²。

(3) CO₂の化学的危険性：2000°C 以上に加熱すると熱分解し，有毒な CO を生じる³²(表 3)。

(4) CO の物理的危険性：空気の比重を 1 とすれば，CO の比重は 0.97 と空気とほぼ等しいので，原子炉建屋の格納容器に滞留する可能性が大きい。CO₂と同様に，非凝縮性のガスであり，大量に発生すると格納容器などの圧力容器の圧力を高め，格納容器の破壊の可能性を高める²²。

(5) CO の化学的危険性：CO は可燃性ガスで爆発の危険性がある。表 2 に示すように，CO の空気中における爆発限界は水素に次いで非常に広い³⁴。表 2 のように，爆発濃度の下限と上限の範囲は CO よりも水素が少し広いが，爆轟濃度の下限は水素より低く，上限は水素より CO が高い。

純粋な CO-O₂ 燃焼の機構の本質は H₂-O₂ 燃焼と同じようには理解されていないといわれていた³¹。しかし，CO-O₂ 燃焼の機構についての速度反応論的な研究によれば，火災または(別の)爆発を契機にして，CO の熱爆発または化学反応により，非常に危険な事故が引き起こされる可能性がある³⁵。

(6) CO 中毒の危険性：よく知られているように，CO は吸入すれば中毒を引き起こす猛毒である。三池炭塵爆発における CO 中毒患者とその家族

表4—ブラウンズフェリー原発における外部電源全喪失後の事象の時系列分析¹⁴

事 例	経過時刻	ガスの発生速度[kg/s]			
		H ₂ O(水蒸気)	H ₂	CO ₂	CO
1: CSB+HPCI/RCIC	513.59分	4.61	0.11	1.01	2.35
2: CSB+HPCI/RCIC+SORV	579.24分	0.63	0.22	2.08	4.63
3: CSB+Manual RCIC & SRV	601.05分	4.70	0.14	1.29	2.88
4: CSB+Manual RCIC & SRV+SORV	596.4分	7.69	0.04	2.58	0.80
5: CSB+No HPCI/RCIC	165分	5.46	0.03	2.58	0.69
6: CSB+No HPCI/RCIC & SORV	206分	1.83	0.20	1.36	4.15

以下引用資料[表]の略号の説明。LOCA=Loss of Coolant Accident 冷却材喪失; CSB=complete station blackout, 外部電源全喪失; HPCI=steam-driven High Pressure Coolant Injection, 原子炉を冷やす高圧注水系; RCIC=Reactor Core Isolation Cooling, 原子炉隔離時冷却系。蒸気タービン駆動のポンプで、格納容器の中に蓄えた溜水を原子炉に注入する安全設備; SRV=Safety Relief Valve, 逃がし安全弁; SORV=Stuck-Open Relief Valve, 開放逃がし弁; CSB+とは外部電源全喪失に加えて種々の操作またはトラブルが重なった場合を意味する。HPCI/RCICは高圧注水系と原子炉隔離時冷却系が利用できること。SORVは小規模の冷却材喪失に対応する。Manual RCIC & SRVは運転員が原子炉隔離時冷却系と逃がし安全弁のそれぞれの遠隔手動操作により水位と圧力を制御すること。No HPCI/RCICはこれら2つの冷却水注入系が機械的な失敗により利用できないこと。

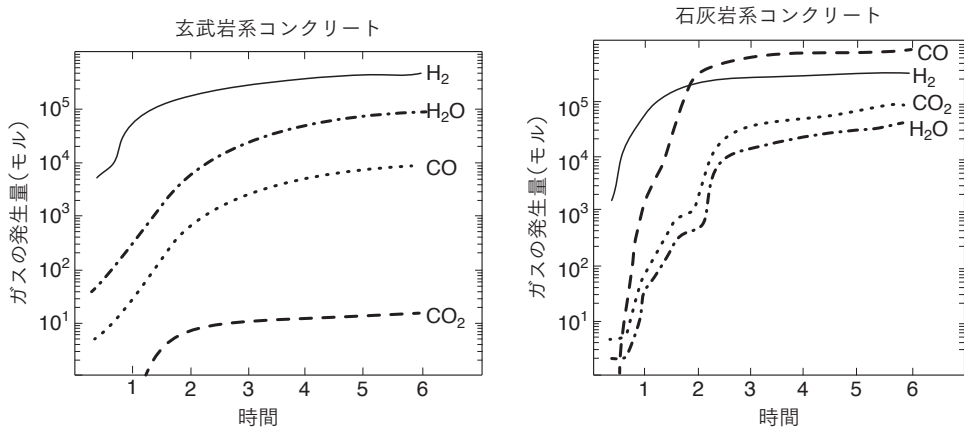


図2—コリウム・コンクリート相互作用によるガスの累積量の時間変化¹⁵
縦軸は累積発生量のモル数(の対数)、横軸は経過時間である。

が体験を語るCO中毒の実態については文献³⁶などを参照されたい。

4 水素, CO₂ および CO の発生量の推定

米国原子力規制委員会(NRC)の報告NUREG/CR-2182(1981)¹⁴では過酷事故の6種類の事例分析が行われている。非圧縮性のガスの発生速度がかなり大きくなる時刻の発生速度を表4に示す。

H₂, CO₂の発生速度はいずれの事例でも大きな値をもつ。CO₂の発生速度は表4のように、1~2.6 kg/sのオーダーである^{14, 22}。

事例4と5を除き、COも数時間が経過すれば、かなり大きな発生速度をもつことがわかる。しかし、このような事例分析はどの程度の現実性をもつだろうか。NRCから解析を委託された米国オークリッジ国立研究所において原発の安全性研究に長年従事してきたGreeneは「福島第一原発における事象の進行は30年前に解析されたシナリオと整合的である」と明言している¹⁷。

これらのガスの累積発生量の時間変化を図2に示す。

玄武岩系コンクリートでは、水蒸気と3種の非圧縮性ガスの中ではH₂が最多であるが、CO、

CO₂の発生量はかなり少ない。しかし、石灰岩系コンクリートでは、COの発生量は著しく多い。新規基準に対する佐藤暁氏の次の指摘と整合的である。すなわち「水素ガスの発生源として、原子炉内での『ジルコニウム水反応』が唯一と見做しているような記述であるが、実際には、原子炉から落下した溶融炉心がコンクリートと化学反応を起こし、水素ガスの他に大量の一酸化炭素も発生し得る。かつてはそのような知見も思慮もなかったため、コンクリートに入れる砂利の種類までは仕様として規定しておらず、定かではない実際の石灰岩の混入量によっては、爆発防止対策設備の設計条件を見直す必要もある。BWRプラントの格納容器では、運転中内部が窒素で満たされており、爆発環境は形成され難いが、事故の進展と対応との状況によっては必ずしも有り得ないことではない」⁵。2種類のコンクリートとともに水素の発生量はかなり多い。表4では水素の発生速度が遅いが、図2では水素の累積量(モル数)はかなり多い。一見矛盾するように見えるが、これは水素ガスのモル質量は2グラムであり、COのそれは約28グラムという約14倍の質量比のためである。

5 福島原発でのCCIによる水素爆発・CO爆発の可能性

本稿で説明したコリウム・コンクリート反応は必ずしも今後の問題ではなく、福島第一原発事故においてすでに起きていた可能性がある²¹。まず、1号機爆発について、政府事故調は水素爆発であり、CCIにより発生するCOが寄与した可能性は極めて少ないとしている¹。しかし、国会事故調²は3月11日当時、急速に進行する1号機の炉心損傷の状況がオークリッジ国立研究所の解析報告書¹⁴とも矛盾がないこと、すなわち、CCIがすでに始まり、水素ガスとともに溶融物が溶け落ちたコンクリートのフロアからは大量のCOも発生し、格納容器の圧力が設計圧力を超過したことも矛盾しないと指摘している。次に、3号機の

爆発について、政府事故調は水素爆発であり、他の可能性を否定している¹。しかし、国会事故調はCCIの寄与を加味すると3号機の爆発の説明はより容易になると説得的な分析を行っている³。この理由の第1は、燃料被覆材ジルコニウム合金がZr-水反応を起こすのは約20%にすぎないというオークリッジ国立研究所の解析における推定にもとづいて、3号機に非常に大きい爆発力をもたらすには水素の量がやや不足しており、CCIにより大量に発生する水蒸気、H₂、CO₂、COが爆発したとすれば、爆発性気体は大幅に増量されること。第2に、爆発直前に観察された閃光のオレンジ色はCOの不完全燃焼であるとするれば理解しやすいこと。第3に、爆発で散乱したがれきの著しく高い放射能レベルについても説明がつく、と指摘している。関連して、フランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)も黒煙の原因の1つとして、コリウムと化学反応した可能性が考えられるという²⁷。さらに、3号機の爆発により鉄筋が上から下へ曲がり、ごく短時間に高温に達したと示唆されている。今後、より深い解明が必要である。

以上述べたように、新規基準において発生可能性が想定されている過酷事故において、CCIが進行した場合、H₂だけではなくCOの大量発生が起こることは明白である。新規基準の原子炉建屋の水素爆発対策について、佐藤氏は「爆発性ガスを水素に限定してよいか否か、即ち、CCI反応によって発生する一酸化炭素の量によっては、水素は処理出来ても依然原子炉建屋が爆発する可能性が残る」と指摘している⁵。このように、条件によっては、水素爆発、水蒸気爆発、CO爆発のいずれかが発生するか、複数が併発するという可能性は否定できない。さらに、COが有意の量発生する場合、たとえ爆発が起きなくても原子炉近くで勤務する職員がCO中毒になる可能性もある。

H₂やCOの爆発について、十分な検討もなく、工学の伝統であった安全余裕度という考え方も踏襲しない、実機における実証実験もない「対策」

は危険性の高い社会的実験を行うことに等しいと言わざるをえない^{注2}。

謝辞：福岡核問題研究会の他のメンバーの皆さんの有益な議論に感謝します。佐藤氏には事故の際に発生するエアロゾルとの関連で貴重な助言をいただいたことに感謝します。

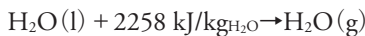
注

1—CCIの反応によっては、より揮発性の低い放射性物質が大量に放散される。主要な核種としてはストロンチウムとプルトニウムが考えられる³⁸。黒鉛減速沸騰型原子炉の事故であるチェルノブイリ事故ではかなりの量のストロンチウムとプルトニウムが放散した³⁹。一方、チェルノブイリ事故ではCCIが進行したことは事実である²⁴。他方、チェルノブイリ事故において、燃料棒は第二の暴走出力が発生した直後に溶融破損し、微粒子となって放出されたという解析がある⁴⁰。したがって、チェルノブイリ事故でかなりの量のストロンチウムとプルトニウムが放散した原因が暴走出力による溶融破損かCCIによるか断定はできない。しかし、原子炉の種類は異なるが、軽水炉の事故でも激しくCCIが起こった場合には、かなりの量のストロンチウムとプルトニウムが放散する問題が懸念される²²。フィルター・ベントのフィルターが、これらの核種に対しても十分な吸着効率を有するのかどうか不明である。

2—CCIの反応によっては、非凝縮性の可燃性(爆発性)ガスが放出されると同時に、図1に記され、文献²²において詳述されているように、大量(トンのオーダー)のエアロゾルが発散され、現在、各電力会社で検討されている「フィルター・ベント」が目詰まりを起こしてしまう可能性がある。つまり、水素や一酸化炭素、二酸化炭素などのガス成分だけがフィルター・ベントに向かって流れていくのではなく、濃い煙のようにになって大量の粒子成分を運搬していくことも考慮しなければならない。

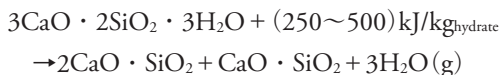
付録1:コンクリートが加熱される場合の重要な化学反応²³

(a) 100°C : 水蒸気の喪失



(l)(エル)とは液体、(g)はガスの意味であり、1 kJ/kg_{H₂O}とは水(H₂O)の1 kgあたり1 キロジュールの意味である。以下同じ)

(b) 100~850°C : 水酸化物の脱水



(hydrate : 水酸化化合物)

(c) 400~600°C : 水酸化カルシウムの脱水



(d) 574°C : 結晶転移

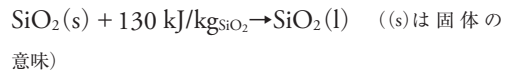


(e) 600~900°C : 炭酸カルシウムの熱分解



(f) 1250~1500°C : ポルトランドセメントの融解

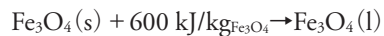
(g) 1423 ± 50°C : 石英の融解



(h) 1462°C : 赤鉄鉱の磁鉄鉱(マグネタイト)への分解



(i) 1597°C : 磁鉄鉱(マグネタイト)の融解



付録2:爆発(explosion)の種類⁴¹

物理的爆発：水蒸気爆発。素材自体は化学的には変化しない爆発。

化学的爆発：水素爆発，一酸化炭素爆発のように、素材自体が化学反応により変化する爆発。

爆燃(deflagration)：燃焼波の前面の伝達速度が音速以下の場合。

爆轟(detonation)：燃焼波の前面の伝達速度が音速以上の場合。

文献

1—政府事故調報告書，2012年。p. 50, pp. 69-73.

2—洲上正朗，笠原直人，畑村洋太郎「福島原発で何が起こったか—政府事故調技術解説」，日刊工業新聞社，2012年。p. 112.

3—国会事故調報告書，2012年。特に，pp. 131-134, p. 146, p. 159.

(pdf版：<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naic.go.jp/report/> pp. 137-140, p. 152, pp. 167-168)

4—原子力安全基盤機構，格納容器破損防止対策について，原子力規制委員会「発電用軽水型原子炉の新安全基準に関する検討チーム」第3回会合(2012年11月9日)提出資料

5—佐藤暁「発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案」の問題点，2013.5

6—倉澤治雄「原発爆発」高文研，2013年。p. 180.

7—館野淳「シビアアクシデントの脅威—科学的脱原発のすすめ」東洋書店，2012年。

8—青木秀樹「安全を確保できない基準にもとづく原発は運転してはならない」科学，vol. 83, No. 5(2013)，pp. 538-544.

9—吉井英勝議員(当時)提出の質問主意書(2006年12月13日)

- 提出, 質問 256 号)に対する安倍晋三内閣総理大臣(当時)の答弁, http://www.shugiin.go.jp/itdb_shitsumon.nsf/html/shitsumon/b165256.htm
- 10—原子力安全基盤機構(JNES)報告「地震時レベル2PSAの解析(BWR)」, 2010年. <http://www.jnes.go.jp/content/000017303.pdf>
- 11—原子力安全基盤機構(JNES)「平成21年度原子炉施設のアシデントマネジメントに係る知識ベースの整備に関する報告書」, 2010年. <http://www.atom-library.jnes.go.jp/seika/000013748.pdf>
- 12—(旧)日本原子力研究所「原子力安全性研究の現状」平成7年(1995年), p. 38.
- 13—牧野淳一郎「原発事故と科学的方法」岩波書店, 2013年. pp. 29-41.
- 14—米国原子力規制委員会(NRC), NUREG/CR-2182(1981), pp. 74-120.
- 15—米国原子力規制委員会(NRC), NUREG/CR6042. ver. 2, (2002), sec. 4.4.
- 16—Report to the American Physical Society of the study group on radionuclide release from severe accidents at nuclear power plants, Rev. Mod. Phys., Vol. 57, No. 3, Part II, July 1985. S59, S106-107.
- 17—S. R. Greene, talk at American Nuclear Society Winter Meeting, 2012. 11. 8, *THE CANARY, THE OSTRICH, AND THE BLACK SWAN: AN HISTORICAL PERSPECTIVE ON OUR UNDERSTANDING OF BWR SEVERE ACCIDENTS AND THEIR MITIGATION* (66 references), http://media.wix.com/ugd/903593_97ef117ecbca067e9d76cd699e3be5dc.pdf
- 18—C. Spengler, et al., *Assessment and Development of Molten Corium Concrete Interaction Models for the Integral Code AS-TEC*, http://www.eurosafe-forum.org/files/pe_382_24_1_seminar2_01_2005.pdf
- 19—B. Spindler et al., *Simulation of Molten Corium Concrete Interaction in a Stratified Configuration: the COMET-L2-L3 Benchmark*, <http://www.sar-net.org/upload/s2-5.pdf>
- 20—C. Journeau et al., *Oxide-Metal Corium Interaction Test in the VULCANO Facility*, Proc. of ICAPP 2007, Nice, France, May 13-18, 2007, paper 7328. http://www.plinius.eu/home/liblocal/docs/PLINIUS-Papers/Oxide-metal_MCCI.pdf
- 21—M. Amizic, *Molten Corium Concrete Interaction: Investigation of Heat Transfer for Two-Phase Flow*, http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/KDI_Milan_Amizic.pdf
- 22—B. R. Sehgal, *Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology*, Academic Press, 2012. 特に, pp. 47-8, p. 97, pp. 195-227, pp. 369-413, pp. 454-478.
- 23—T. Sevón, *Molten Core Concrete Interactions in Nuclear Accidents*, VTT TIEDOTTEITA-RESEARCH NOTES 2311, VTT Technical Research Centre of Finland.
- 24—ミロバノフ他著, 青柳征夫訳「チェルノブイリ原子力発電所事故—コンクリート構造物に及ぼした影響」, 技報堂, 2013年.
- 25—耐火物協会, <http://www.taikabutsu.gr.jp/refractories/>
- 26—東北大学流体科学研究所 圓山・小宮研究室, ドライアウト時の崩壊熱が燃料棒の温度上昇に及ぼす影響, Heat-Transfer Control Lab. Report No. 7, Ver. 1 (HTC Rep. 7. 1, 2011/4/8)
- 27—小林一輔「コンクリートがあぶない」岩波新書, 1999年. pp. 32-33, 36-37, 74-76, 79, 102-109.
- 28—石灰石鉱業協会編「石灰石骨材とコンクリート補遺版2012」, 2012年.
- 29—E. E. ルイス「原子炉安全工学(下)」現代工学社, 1986年, pp. 150-158.
- 30—水素ガス対策ワーキンググループの調査審議のまとめ <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/suiso/suiso019/siry03.pdf>
- 31—N. Cohen, *Flammability and Explosion Limits of H₂ and H₂/Co: A Literature Review*, Aerospace Report No. TR-92(2534)-1, 1992.
- 32—国際化学物質安全性カード; 二酸化炭素 <http://www.nihs.go.jp/ICSC/icssj-c/icss0021c.html>
- 33—http://carbon.atomistry.com/decomposition_carbon_dioxide.html
- 34—国際化学物質安全性カード; 一酸化炭素 <http://www.nihs.go.jp/ICSC/icssj-c/icss0023c.html>
- 35—E. Lapierre, *Chemical Kinetics and Thermal Explosion for Carbon Monoxide/Oxygen, 2012*. http://ericlapierre.ca/files/2012/03/EricLapierre_Project2.pdf
- 36—森弘太, 原田正純「三池炭鉱—1963年炭じん爆発を追う」NHK出版, 1999年.
- 37—フランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)の見解. <http://www.afpb.com/articles/-/2792610?pid=7005562>
- 38—田辺文也「まやかしの安全の国—原子力村からの告発」角川SSC新書, 2011年. 特に, p. 198.
- 39—国際原子力機関(日本学術会議訳)「チェルノブイリ原発事故による環境への影響とその修復—20年の経験」, 2006年. 特に, pp. 2-3.
- 40—石川迪夫, 若林利男, 塩沢周策, 望月弘保, 大西信秋「チェルノブイリ原子力発電所の事故シナリオに関する考察—原子炉出力の異常な上昇から黒鉛火災に至るまで」, 原子力工業, 32巻12号(1986)17-26.
- 石川迪夫「原子炉の暴走 SL-1からチェルノブイリまで」日刊工業新聞社, 1996年.
- 41—高島武雄, 飯田嘉宏「蒸気爆発の科学—原子力安全から火山噴火まで」裳華房(1998); W. C. デービス「爆轟のメカニズム」, サイエンス(現, 日経サイエンス), 1987年5月号, pp. 86-95; M. A. Liberman, *Introduction to Physics and Chemistry of Combustion: Explosion, Flame, Detonation*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008