

2000年1月26日
サテライトミーティング「JCO臨界事故を考える」

JCO臨界事故を考える 「何が起こったのか、炉物理的視点から」

京都大学原子炉実験所
三澤 毅

事故経過状況

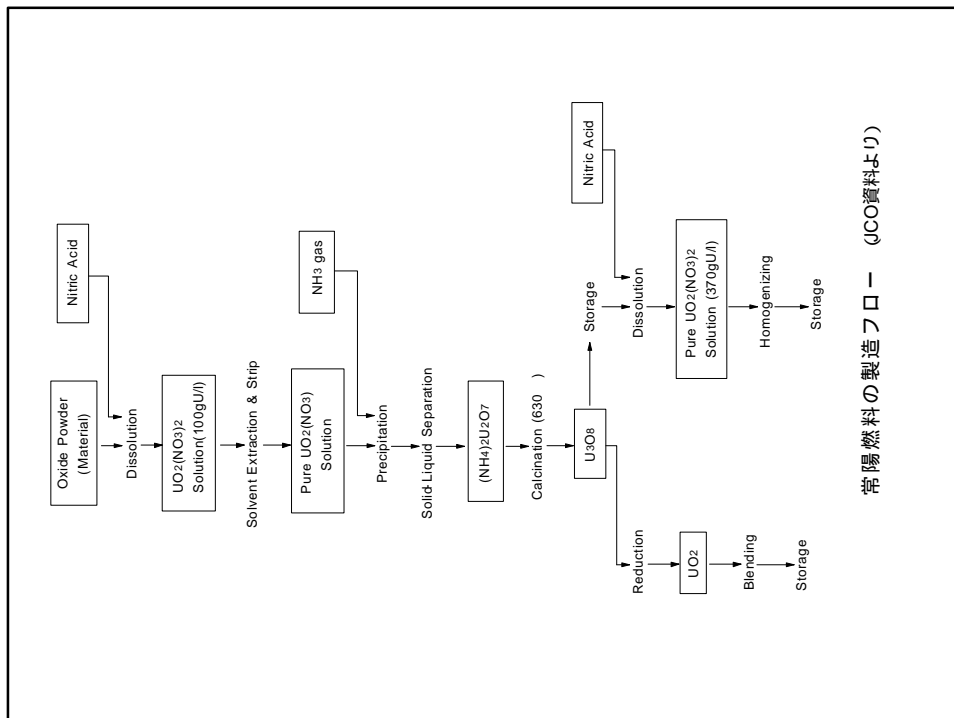
1999年9月30日

- 8:30 作業開始
- 10:10 7バッチ目作業
- 10:35 転換試験塔でエリアモニター警報
- 15:00 350m圏内住民に避難要請
- 16:30 中性子線測定開始
- 22:30 10km圏内の住民に屋内退避勧告

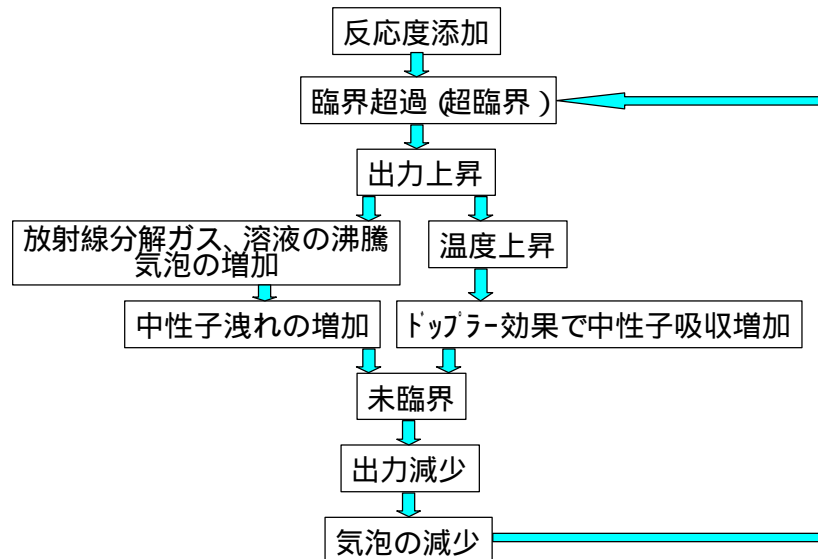
10月1日

- 2:35 沈殿槽の冷却材抜き取り作業を開始
- 4:00 中性子線量低下を確認
- 6:15 冷却水抜き取り作業終了
- 6:30 中性子線量検出限界以下を確認
- 8:19 沈殿槽へのホウ酸水注入作業を開始
- 9:18 ボロン水注入終了

- 高速炉実験炉「常陽」用の高濃縮ウラン(18.8%)燃料製造過程で事故発生
 - 「常陽」では燃料の融点低下を防ぐためにPu富化度の最大値を30%に設定
 - 小型炉であるため中性子漏洩が多くPu富化度30%では臨界とすることができないため濃縮ウランを添加
 - 99年度に60kg製造を予定(第9次キャンペーン)
- 沈殿槽に硝酸ウラニル($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$)を注入して超臨界(即発臨界)となった
- 出力暴走後、しばらくして定常状態となり臨界状態が継続した
- 沈殿槽周囲にある冷却水(厚さ約20mm)を抜き取ることにより未臨界とすることができた



溶液系での臨界事故の経過例 (初期)



出力暴走後の経過

- 体系が壊れたり 核分裂性物質が飛び散るなどして未臨界となる
- 臨界が継続する (今回のJCO事故のケース)
 - 溶液温度が上昇しドップラー効果等の影響で未臨界
 - 出力が低下して徐々に温度低下
 - ・ 容器からの放熱、冷却水の効果
 - 再び臨界超過 (即発臨界ではない)となり緩やかな出力上昇
 - 以上を繰り返しながら定常状態に落ち着く

バースト部 (10:30 ~ 11時頃まで)

- 7バッチ目注入作業 (バッチ当たり2.4kgU、6.5リットル)
 - バケツ (10リットル) 中の6.5リットルを2つに分け、ビーカー (5リットル) により漏斗を使ってハントホール (保守点検やサンプリング用の穴) から沈殿槽に注入
 - ビーカーからの注入の2回目に臨界超過 (事故後、ビーカーに1.5リットル残)
- 第1バースト
 - 反応度添加量3ドル未満
 - 最初の暴走出力 : 7 ~ 20MW
 - 最初の核分裂数 : $(4 \sim 10) \times 10^{16}$
 - 半値幅100msec、最短ペリオド30msec
- 5 ~ 6回の出力暴走 (?)
- バースト部の核分裂総数 : $(2 \sim 3) \times 10^{17}$

プラト一部 (11時から終息まで)

- 平均出力 約1 kW
- 沈殿槽周囲の冷却水により熱除去
 - 沈殿槽の熱除去に関する特性を試験中 (?)
- 沈殿槽周辺の冷却材の抜き取り作業
 - 1回では抜くことができず、外部からの注入ガスで押し出す
 - 反応度効果は-4 ~ -5ドルで、十分に未臨界とすることができた

核分裂総数の推定

- 溶液サンプリングの核種分析結果より 2.5×10^{18}
- 沈殿槽近くのステンレス製ネットの放射化分析の結果 (Ni-58, Fe-54) より $2.3 \sim 2.4 \times 10^{18}$
 - モンテカルロ法 (MCNP-4B) の計算値を用いる
- バースト部とプラト一部との核分裂数の比率は、原研那珂研究所の屋外中性子モニターの値から推定 : (11.4% : 88.6%)

臨界事故模擬実験

- フランス (Valduc研究所)
 - CRAC (高濃縮硝酸ウラニル水溶液)
 - SILENE
- 米国 (LANL)
 - SHEBA (低濃縮フッ化ウラニル水溶液)
- 日本 (原研) 1996年より
 - TRACY (低濃縮硝酸ウラニル水溶液)
 - 過渡出力運転時 最大5000MW
 - 最大反応度 3ドル
- これまでの臨界事故例を表6.1.1と6.1.2に示す (臨界安全ハンドブック 第2版 (JAERI-1340))より)

表 6.1.1 核燃料施設における臨界事故

施設名 発生年月日	事故概要と全核分裂数	臨界時の状況	警報発生の有無と退避状況	事故現場の線量率状況	臨界モニタの形式 とアラーム設定値	被曝状況
ORNL Y-12 (Oak Ridge, Tenn.) 1958.6.16	濃縮 U 液がリークテスト用の水と一緒に 208 ドラム缶に入り臨界。 1.3×10^{18}	U 水溶液 56.2 中 ^{235}U 2.1kg で臨界、出力スパイク 10^{16} 、プラトー出力 1.29×10^{16} (約 3min.)、継続時間 18min、遮蔽なし。	現場で 8 人作業中、事故と同時に警報が吹鳴、迅速な退避が行われた。	事故直後、現場より 107m の所で、100mR/hr、3hr 後ドラム缶より 30.5m の所で 60mR/hr。	GM 使用、工場を中心より約 24.4m 点に 8 個設置。アラーム設定点は 1mR/hr、事故後は 3mR/hr に変更。	8 名被曝 28 ~ 461rem
LASL (Los Alamos N.Mexico) 1958.12.30	廃液から Pu を回収する工程で計量作業のため Pu 含有液を処理タンクにいれ攪拌した時に臨界。 1.5×10^{17}	96.5cm の 850 処理槽、Pu 溶液 160 中 Pu 3.27kg、Pu は溶媒側に分配、攪拌時に臨界。出力スパイク 1.5×10^{17} 、継続時間 2sec、遮蔽なし。	事故発生と同時に警報吹鳴全員退避、付近にいた 2 名は救助活動を行う。	事故直後、現場より 53.3m 離れた場所の臨界警報が吹鳴。処理槽より 7.6m 離れた場所で 20R/hr。	電離箱使用、2 個以上の信号で警報発生、内蔵線源により故障検出。アラーム設定値は 1 と 10mR/hr。	12000rem 被曝 1 名死亡。 他は 53 ~ 134rem
ICPP (Idaho Falls, Idaho) 1958.10.16	硝酸ウラニルをサンプリングのため空気攪拌、サイホン作用発生、非安全形状タンクへ移送、臨界。 $\sim 4 \times 10^{19}$	18900 のタンクに $170\text{g}^{235}\text{U}$ 溶液が 200 流入。全水溶液量 800、 ^{235}U 34.0kg で臨界。出力スパイク 10^{17} 、遮蔽あり。	貯留タンク区域のベントラインを通してプロセス建屋空気汚染、モニタ吹鳴、口頭及び電話により退避。	退避地点で建屋の外側及び入口西方 119m の所で 5R/hr 以上 (放射性ガスによる。)	電離箱型検出器 20 個の臨界警報装置を設置。アラーム設定値は 20mR/hr。	1 1 名被曝 2 ~ 50rem
ICPP (同上) 1961.1.25	蒸発缶ポンプの詰り物除去作業中、非安全形状部に溶液が吹き上げられ臨界。 6×10^{17}	蒸発缶上部の径は 61cm 非安全形状、U 液 40 中 ^{235}U 8kg が吹き上げ臨界。出力スパイク 6×10^{17} 、遮蔽あり。	臨界と同時に放射線警報吹鳴、手で緊急退避警報を鳴らす。	事故直後の施設内は通常のバックグラウンド、施設の風下地点で放射性雲により 30mR/hr。	同上	被曝は 線のみ 0 ~ 55mrem
Recuplex (Richland, wash.) 1962.4.7	施設洗浄作業中、床のサンプルにたまった Pu 液が非安全形状容器に吸い上げられ臨界。 8×10^{17}	46cm 69 円筒容器、Pu 液 46、Pu 1.5kg で臨界。出力スパイク 10^{16} 、継続時間 37hr、遮蔽なし。	臨界警報吹鳴、退避は迅速、事故時、容器の最も近くの人までの距離は 1.5 ~ 8m。	事故現場の線量は不明、スタックより約 1200Ci 希ガス放出。	234-5 建屋には NaI 検出器 10 個よりなる臨界モニタあり、アラーム設定値 500mR/hr。	3 名被曝 19 ~ 110rem
UNC Wood River Junction 1964.7.24	ラベル不備、濃縮 U を非安全形状のメークアップタンクに入れ臨界。 1.2×10^{17}	45.7cm 66cm 深さの円筒容器、 0.54MNaCO_3 中に 10 中 ^{235}U 2.6kg を含む液を入れ臨界、出力スパイク 10^{17} 、遮蔽なし。	警報吹鳴については不明、事故当事者は青白い光と液の噴出を見て退避。	事故直後タンク付近は最高 100mR/hr のサーベイでフルスケール、線量の詳細は不明。		骨盤 46000rem 頭部 14000rem 死亡。
U.K.AEA Windscale 1970.8.24	Pu 回収工程中非安全形状の容器に溶液を移送し終わったときに臨界。 1×10^{15}	61cm、68.6cm 深さの容器、55gPu/ と 6~7gPu/ 液 50 で臨界、出力スパイク 10^{15} 、継続時間 5~10sec、遮蔽あり。	臨界警報吹鳴、全員迅速に退避、被曝検査を受ける。	事故 10min 後 4 階コントロール区域で 200mR/hr、スタックより約 5mCi 放出。		2 名被曝 2rad 以下
ICPP (Idaho Falls, Idaho) 1978.10.17	洗浄用の硝酸アルミニウム濃度低下、ウラン濃度上昇で臨界。 2.74×10^{18}	溶媒抽出工程第 1 サイクル洗浄塔の硝酸アルミニウム濃度が低下、ウラン濃度 22.2gU/ で臨界。遅発臨界、遮蔽あり。				なし

表 6.1.2 ロシアの臨界事故

No.	年月日/場所	発生状況/原因	停止機構	核分裂数	被曝線量	その他
1	1953.3.15 Mayak Enterprise, Urals Pu 溶液受槽	セル内の 2 槽の Pu 硝酸溶液を、セル外の 1 槽に移した。溶液は 26l (650gPu)の予定であったが 31l だった。	溶液を元の槽に戻した。	バースト 2.5×10^{17}	1 名: 1000rad (重症) 1 名: 100rad	放射線エタなし。 スタッフへの指示、事故訓練なし。直後の報告せず。
2	1957.4.21 Mayak Enterprise, Urals U 精製容器	精製容器内に高濃縮 U-シュウ酸塩(Oxalate)の沈殿 3.4kg が蓄積。いつ臨界に達したかは不明。作業員が、フィルムの膨れ、沈殿からのガス発生を発見。	液の一部を真空トラップに排出。	2×10^{17}	1 名: 12 日後に死亡 5 名: 障害	放射線エタなし。 定期的なクリアアウト行わず。
3	1958.1.2 Mayak Enterprise, Urals 臨界実験装置	高濃縮 U 溶液の実験後、タンクの固定ボルトを外し、溶液を排出しようとタンクを傾けたところ臨界。作業員 3 人の反射体効果もあった。	液の飛散。	バースト 2.3×10^{17}	3 名: 5-6 日後に死亡 1 名: 重症、失明(3m の距離)	規則違反及び安全対策不十分。 装置は解体された。
4	1960.12.5 Mayak Enterprise, Urals Pu 溶液フィルム容器	非安全形状の容器内に Pu 170g を含む沈殿。830gPu を含む溶液が注入。第 1 バースト後、液が配管に押し出され、反応が停止したが、緊急措置で真空系を停止したため、液が容器に戻り 2 回目の臨界。		バースト 10^{17}	数名: 最大 5rad	警報エタ有り。工程の記録管理不良。Pu 質量の分析誤差が多数のケースで 100% (規定では 20%)
5	1961.8.14 Siberian Chemical Combine UF ₆ 濃縮・蒸発系	濃縮度 22.6%の UF ₆ ガスの冷却容器に接続されたポンプのオイル容器(60l)に UF ₆ が蓄積。濃度 400gU/l となり臨界。警報作動、作業員退避。その後のバーストで異常が認められず再起動。再び臨界。	温度上昇、オイル排出。	バースト 10^{16} 5×10^{15} が 2 回	1 名: 200rad	プルトニウムのエタなし。 UF ₆ ガスの冷却不十分。 設備を再設計、再建設、マニュアルを改訂。
6	1962.9.7 Mayak Enterprise, Urals Pu スクラップ溶解槽	Pu 溶解槽(450mmD,100l)にて最終溶解作業終了(攪拌及びヒーター停止)後、警報作動、作業員退避。第 1 バーストの後、40-50 分間に 2 つのバースト。槽内に 1.32kg の Pu が有り、一部未溶解だった。	溶液の排出。	バースト 2×10^{16}	有意な被曝なし	溶解槽は 5cm の鉛遮蔽有り。近くに人はいなかった。
7	1963.1.30 Siberian Chemical Combine U スクラップ再処理	溶解する高濃縮 U 金属片の U 量 5%U(50gU/kg)を 5gU/kg と認識。溶解後の分析でエラーを発見、液は分けられたがその後の分析で再び 1/10 に評価。40l(71gU/l)の溶液が非安全形状タンクに移され臨界。6 時間の出力振動後(液の排出 - 戻り)、準定常状態に。	10 時間後に、液を移送。	バースト 7.9×10^{17}	4 名: 6-17rad	第 1 スパイクで警報作動、作業員は退避した。
8	1963.12.13 Siberian Chemical Combine U 抽出施設	高濃縮 U 移送管に接続された真空系のトラップ(100l)に抽出剤が混入。オイルした U 溶液と接触し、U を抽出。トラップ内が 33gU/l の溶液で満たされ、臨界。第 1 バースト後、6 時間に 16 回の出力振動。真空系を停止したところ、液が再混入し、バーストと出力振動発生後、準定常状態に。	カドミウム溶液の注入による。	第 1 バースト 1.6×10^{15} バースト(18hr) 2×10^{17}	被曝なし	警報作動により、退避。
9	1965.11.13 Electrosta Fuel Fabrication Plant U 転換施設	6.5%濃縮 UO ₂ 粉末を濾過する 2 重のフィルムに穴が開き、粉末(スリ)が真空ポンプの水リザーバ(300mmDx650mmH)に 157kg(U:51kg)蓄積し臨界。		バースト 10^{15}	1 名: 3.5rad	フィルムの点検が殆ど行われていなかった。NDA は行っていない。警報作動により、退避。装置は解体された。
10	1965.12.16 Mayak Enterprise, Urals U スクラップの溶解	高濃縮 U スクラップ 2.2kg が溶解槽(450mmD)に装荷され、臨界。手順では 1.5 時間溶解する工程を 40 分で停止した(予定されていた室内清掃のため)。10 分後に警報作動、7 時間で 11 のバースト発生。	カドミウム溶液の注入による。	バースト 7×10^{17}	最大 0.03rad	規則違反。燃料管理の不備。溶解槽の臨界量は 2kgU 以下。
11	1968.12.10 Mayak Enterprise, Urals Pu 抽出施設	低濃度 Pu 溶液の入った 4000l のタンク内に有機溶液が混入。有機溶液の除去作業中、約 40l の液を 60l の非安全形状容器に移したため、臨界。有機溶液中に高濃度の Pu が存在していた。直長が排液しようとし、再び臨界に。	排液による。	1 回目 10^{16} 2 回目 5×10^{16}	1 名: 死亡(直長) 1 名: 重症(両足切断)	警報作動で作業員は退避したが、直長が現場に戻り、容器内の液を排出しようとして被曝した。
12	1978.12.13 Siberian Chemical Combine Pu 金属保管容器	Pu 金属塊(インゴット)の保管容器に、インゴットを 3 個入れ、4 個目を入れようとしたときに、臨界となった。4 個目は弾き飛ばされた(eject された)。	作業員が手でインゴットを取り除いた。	3×10^{15}	1 名 全身: 250rad 手: 2000rad 7 名: 5-60rad	容器にはバリケードとカドミウムを入れる空間があったが、Puインゴットも入る作りであったため、複数のインゴットが入られた。