

スーパーカミオカンデ事故等報告、その二

平成14年1月5日
現地事故対策班

目次

1. 第1回原因究明等委員会以後
2. 内水槽および外水槽関連増倍管等の被害
 - (1) 内水槽
 - (2) 外水槽
 - (3) 増倍管の破壊状況について
 - (4) タンクライニングおよび岩盤に関する被害
3. 原因究明：最初の増倍管の爆縮
 - (1) 9本の履歴等
 - (2) 最初の増倍管の同定
 - (3) 交換球の目視検査及び強度等試験
 - (4) ストック球の目視検査及び強度等試験
 - (5) 増倍管保持金具の締め付け不良に関する考察
 - (6) 作業手順等に関するアンケート結果
 - (7) 底面ステンレス板浮き上がりに関する考察
 - (8) 底面作業について
 - (9) 結論
4. 原因究明：衝撃波の発生と伝播
 - 4 - 1 衝撃波
 - (1) 誘爆再現実験
 - (2) シミュレーション結果
 - (3) シミュレーションと再現実験との比較
 - (4) 結論
 - 4 - 2 水流等による機械的連鎖破壊
5. 今後の対策について
 - (1) 作業手順の改良
 - (2) 衝撃波防止ケース
 - (3) 高耐水圧増倍管の開発
6. 結論

1. 第1回原因究明等委員会以後

11月22日の第1回委員会では、被害の状況と事故原因につながるとされる種々の可能性を列挙するとともに、当時判明していた情報及びデータを提出した。

その後、被害状況の最終的把握につとめること、原因の特定に関して最初に爆縮した増倍管に関する過去の履歴、交換球やストックされていた増倍管の圧力試験等一連の試験、増倍管取り付け作業等に関するアンケート調査、底面作業のシミュレーション等を行い、増倍管の爆縮に伴う衝撃波の発生とその伝播、さらに衝撃波による隣接増倍管の破壊に関するシミュレーション、スーパーカミオカンデ底面における再現実験、種々のデータの取得、データとシミュレーション結果との比較等を行った。

(資料：フロー)は、事故原因の可能性の列挙と、それを検証するための作業のフローを示したものである。該当する注に作業の手順及び結果を詳述している。

事故原因の可能性の中で、外的要因、すなわち事故直前の地殻変動や、山はね、タンク構造体の大規模な変動等を可能性としてあげたが、いずれもその可能性がないと結論された。その根拠は(資料：地震、岩盤、タイベック)に示した。ただし、地下水圧による底部浮き上がり時の衝撃が事故の引き金になった可能性があったので、施工業者とともにその影響を調べたが、増倍管が破壊されるほどの影響は受けなかったと結論した。これに関しては小節を設けて記述した。

本報告書では、事故原因として最も可能性の高い増倍管起源に関して記述する。

第1回委員会において最初に爆縮を起こしたと思われる底部増倍管は9本に絞られた。観測データの調査から2本の増倍管に可能性を絞った。1本は改修時に交換した10850であり他の1本は交換しなかった10810だった。

そのうちの1本が爆縮を起こした原因に関してさらに調査を行った結果、

底面作業に伴うストレスが増倍管に残り約3気圧の水圧によって爆縮を起こした、改修工事で行った増倍管の運搬や交換作業の際、増倍管電極(ASSY)付近に微少なクラックが生じ、約3気圧の水圧によって爆縮を起こした、

の可能性が残った。

以上の結論の根拠として、

- (1) 12本の交換球を使って底面作業のシミュレーション(実際の作業と比べて約8倍以上の積算ストレスを増倍管にかけた)を行ったところ、そのうちの1本が圧力試験(6.5気圧24時間)で増倍管ネック部の円周上で破断した。増倍管の軸方向縦向きに荷重がかかったことを示唆する割れ方である。
- (2) 交換球の精密な目視検査を行ったが、1本の増倍管の光電面がかなり色落ちしておりASSY付近に微少なクラックが入っていること、その外側にあるポリエチレン熱収縮チューブ上に何かに当てたと思われる打痕があることを発見した。以上から当該増倍管は作業時に撃力を受けたことがわかった。

これ以外の一連の試験では事故に結びつくような結果はでなかった。

次に、衝撃波の発生とその伝播、それによる隣接増倍管の破壊に関しては、実際に衝撃波が発生することをシミュレーションによって示すこと、及び、隣接増倍管が破壊されるかどうかを再現する実証実験を行った。シミュレーションによると、爆縮の始まりか

ら衝撃波が発生するまでの時間が約10ミリ秒、隣接増倍管へのピーク圧力が数10メガPa、衝撃波の作用時間が約50マイクロ秒となった。衝撃波パルスの時間幅は非常に短いので力積は小さく、衝撃波が実際に増倍管破壊の連鎖反応を起こすかどうかは明らかでない。そこで12月25 - 27日に一連の実験を行った。テスト用の治具に、9本の増倍管をスーパーカミオカンデ実験と同じ間隔かつ同じ金具を用いて3×3に配置し、事故時とほぼ同じ深度である水面下約30メートルに沈めた。そして、その中央の増倍管を人為的に破壊することにより8本の隣接増倍管が破壊されるかどうかを調べた。その結果、3回の破壊実験すべてにおいて誘爆が起こりすべての増倍管が破壊された。これにより、1本の増倍管の爆縮による衝撃波が大量破壊を引き起こしたことが明らかになった。

同時に、隣接増倍管の破壊の様子を詳細に観測し、水流による機械的破壊が連鎖反応を引き起こしたのではないことも明らかになった。

2. 内水槽および外水槽関連増倍管等の被害

(1) 内水槽関係

破壊増倍管数：	6777	(11146中、50cm径)
使用可能増倍管数：	4369	
電子回路：	被害なし	
高電圧回路：	被害なし	
ケーブル：	不明	
増倍管取り付け金具：	多数	
黒プラスチックシート：	要全数取り替え	(注1)
タンク外壁：	少量の漏水	(4.2トン毎時)

(2) 外水槽関係

破壊増倍管数：	1100	(1885中、20cm径)
使用可能増倍管数：	785	
電子回路：	被害なし	
高電圧回路：	軽微な被害	
波長変換板：	700	(1885中)(注2)
タイベックシート：	要全数取り替え	(注3)
ケーブル：	不明	
増倍管取り付け金具	多数	

(注1) 内外水槽を光学的に遮蔽するシート

(注2) 20cm径増倍管の周りに置かれた波長変換剤をドープしたプラスチック板

(注3) 外水槽全体に張った光乱反射用シート

(3) 増倍管の破壊状況について

タンク側面の増倍管の破壊状況を観察した結果、約76%の確率でダイノード部分がタンク内側に飛び出していることがわかった(資料：ダイノード)。このこ

とから増倍管の破壊時に、後ろからの水圧に押されてASSYに結合しているダイノード部が光電面方向に突入したことが伺える。(4.4-1. 参照)

(4) タンクライニングおよび岩盤に関する被害

水中カメラによる側壁及び底面の詳細な目視検査により、壁面にあるタイベックシートに損傷が認められなかったし、岩石等が水槽内に散乱していることも認められなかった。(資料：タイベック)以上から、タンクライニングには小さな亀裂が入ったものの、ライニング及び岩盤は大規模な損傷を受けなかったと結論した。

増倍管の爆縮によって生じた衝撃波が壁面に伝播して及ぼす瞬間的な圧力を考察した結果、底部マンホール胴部や側部・底部の隅肉溶接箇所及びライニング裏側のコンクリート充填不足箇所で剪断亀裂を生じさせた可能性があるが、大規模な破損を起こすことはないと考えられる。(資料：ライニング)ソナーによる漏水場所の探索を行い、漏水場所を3カ所程度に絞り込んだが、最終的な場所の特定はできていないため(資料：ソナー)、以上の可能性は、タンク排水時の詳細な検査により確認する。増倍管の破損によって生じた水流が壁面に及ぼす流体力は、ライニングに大規模な損傷を与えるほど大きくないことがわかった。(資料：ライニング)

また、衝撃波による圧力は周囲の岩盤強度と比べて無視できるので、岩盤が重大な損傷を受けたとは考えられない。(資料：岩盤強度)

以上からタンクライニング及び岩盤が大きな損傷を受けなかったと結論できる。従って、排水時に岩盤の崩落等2次災害が起きることはない。

3. 原因究明：最初の増倍管の爆縮

(1) 9本球の履歴等

これら9本球に関する出荷時のデータ等過去の履歴を精査したが特段の異常は認められなかった(資料：履歴)また、スーパーカミオカンデ建設時に行った増倍管取り付け作業や増倍管運搬に関して作業員へのアンケートをおこなったが、5年後にも記憶に残るような危険な増倍管取り扱いを記憶している作業員はいなかった。(資料：アンケート9本、アンケート建設)また、9本のうち1本は改修作業で交換した増倍管であったため、改修作業員についてもアンケート調査を行ったが、同じく増倍管に事故に結びつくようなストレスや撃力を与えるような経験を持ったものはなかった。(資料：アンケート改修)

(2) 最初の増倍管の同定

前回の委員会時に、最初に爆縮を起こした底面増倍管を9本まで絞り込んだ。爆縮直後から8ミリ秒における観測データの詳細な検討を行い、9本のうちどれが最初に爆縮を起こしたのかを同定する努力が引き続きなされた。イベントディスプレイによる放電光のパターン、増倍管の信号頻度、信号の時間情報の解析から、改修作業時に交換した10850(資料：10850)が疑わしいことがわかった。10850は大口径部のガラス厚が他の増倍管に比べて薄い特徴を持っているが、設計

基準値の中に入っていて、特段異常な球ではない。（資料：履歴）

改修工事終了後の9月28日から11月11日の事故直前までに取得された観測データを解析したところ、改修時に交換されなかった10810が、10月10日頃から事故直前までバースト状のノイズを発生していることがわかった。このノイズはいわゆる光球と比べると大変弱いものであるが、他の8本の増倍管にはそのような振る舞いは観測されなかった。（資料：10810）従って、10810も疑わしい増倍管と考えざるを得ない。残念ながらこれ以上最初に爆縮した増倍管を絞り込むことはできなかった。

（3）交換球の目視検査及び強度等試験

改修時に交換した増倍管は、5年間水中に置かれ、かつ底部の球は約4気圧の水圧を受けていた。この環境がガラスの強度等に影響を及ぼしている可能性があるので、交換球に対して目視検査（209本）（資料：目視 交換球）、圧力試験（底簿、側部、上部からそれぞれ3本）、圧力サイクル試験（底部2本、側部1本）、温度サイクル試験（9本）（資料：圧力等）、ガラスの機械強度等試験（資料：ガラス試験）を行った。

目視検査において、1本の増倍管（CD6512、水深12.9m側壁に設置されていた）の光電面がかなり色落ちしておりASSY（電極）付近に微少なクラックが入っていること、その外側にあるポリエチレン熱収縮チューブ上に何かに当たったと思われる打痕があることを発見した。以上から当該増倍管は作業時に撃力を受けたことがわかった。改修時この増倍管を扱った作業者に聞き取り調査を行ったが、増倍管に衝撃を与えたことを記憶している者はいなかった。

ところが、CD6512は1995年にスーパーカミオカンデに取り付けられる直前の信号検査では問題点はないが、取り付け直後に高電圧の不安定性を惹起したり、最初の光球として純水注入前に使用不能となった増倍管であることがわかった。つまりCD6512はスーパーカミオカンデ建設時にクラックを引き起こす衝撃を受けたと考えられる。（資料：クラック履歴）

以上から、取り扱い時に受けた撃力により損傷を受けた増倍管がスーパーカミオカンデ内に存在したことは事実である。

それ以外の試験において増倍管の強度等に異常な点は見つからなかった。（資料：圧力等、ガラス試験）

（4）ストック球の目視検査及び強度等試験

爆縮を最初に起こした可能性の最も高い増倍管10850は、今回の改修作業で交換した球である。この球は他の交換球とともに数年間湿度100%、温度14度、暗黒の坑道内にストックされてきた。以上の環境は、スーパーカミオカンデ内の暗黒、温度13度、4気圧の水中と比べれば格段に穏やかなものであるが、確認のため、目視検査（306本）（資料：目視 ストック球）、及び圧力サイクル試験（9本）（資料：圧力等）、ガラス試験（資料：ガラス試験）を行った。

いずれの検査においても異常はなかった。

（5）増倍管保持金具の締め付け不良に関する考察

増倍管取り付け時最も重要な作業は、トルクレンチによって増倍管の20インチ口

径部と10インチ口径部にゴムを緩衝材として挟んだステンレスバンドを締め付ける作業である。締め付けすぎるとガラスのストレスがかかりすぎ破壊に至るおそれがあり、締め付けが緩すぎるとガラスとゴム間の摩擦力が弱すぎて増倍管がバンドからはずれて浮き上がる恐れがある。トルクレンチの設定トルクは5 Nmの大きさであった。ただし実際の作業では11 Nm程度で締めていた。このトルクとガラス管の座屈応力との関係、及びトルクとガラス部への抗力や摩擦力を考察した結果、ガラス部の破壊や浮き上がりは起きることはないという結論に達した。(資料：トルク)

(6) 作業手順等に関するアンケート結果

1995年のスーパーカミオカンデ建設時の増倍管取り付け作業や運搬等で今回の事故に結びつくようなストレスや衝撃を増倍管に与えた経験や記憶があるかどうかを、当時作業に従事した共同研究者にアンケート調査を行った。65名にアンケート用紙を配布し、35名から回答を得た。回収されたアンケートのうち21人の作業者の証言から運搬中での破損事故を除き、増倍管に対する衝撃は工具の軽い接触あるいは運搬中の振動程度であることがわかった。たとえ振動があっても運搬時増倍管は発泡スチロール製梱包材で覆われているため衝撃は非常に軽微であったと考えられる。以上から、スーパーカミオカンデ建設時に今回の事故につながるような重大な過失はなかったと考えられる。(資料：アンケート建設)

また、事故直前に行われた改修作業時の増倍管取り付け作業や運搬等についてもアンケート調査を行った。回答者は77名、うち70名が実際に改修作業に当たった。その結果、スーパーカミオカンデ建設時と同様、軽度の衝撃を与えたものや大きな事故につながる可能性のある出来事はいくつかあったが、今回の事故の原因につながる増倍管の強度を損なうような出来事はアンケートの回答からは得られなかった。(資料：アンケート改修)

(7) 底面ステンレス板浮き上がりに関する考察

第1回委員会で詳しく報告したように、スーパーカミオカンデ完全排水後の8月28日、底部ステンレス板下の地下水による水圧のため、ステンレス板とアンカーの溶接部分が数カ所破断し、大音響とともにステンレス板が数cm跳ね上がった。直ちに、ステンレス板の20数カ所に8mm径の穴を開けて水圧を逃がした。跳ね上がり時の衝撃が増倍管に与えた影響を施工業者とともに考察した。その結果、衝撃の大きさは小さく、さらに架構柱、架構、取り付け金具、そして増倍管と伝播の距離が長いので衝撃は減衰し、増倍管の破壊に至るような損傷を与えることはない。ステンレス板跳ね上がり時に架構柱下とアンカーとの溶接部の破断が心配されたが、アンカーは跳ね上がり時の荷重に十分耐えられる強度を持っており、破断していないと考えられる。万一破断が起きたとしても、その持ち上がりによる増倍管への荷重は高々500g重であり、増倍管に損傷を与える大きさではない。(資料：底部浮上)

以上の考察から、底面ステンレス板の跳ね上がりが事故の引き金になった可能性はないと結論した。

(8) 底面作業について

底面作業が事故につながった可能性についても第1回委員会で報告した。

大きな発泡スチロールボードを底部増倍管の上にしき、作業者がその上を歩行したり作業を行うことにした。作業による荷重は複数本の増倍管に分散されるので、増倍管にかかるストレスは大幅に軽減されるはずである。また、十分なモックアップテスト及び増倍管の耐荷重テストを行い、作業が増倍管に損傷を与えないことを確認した。（第1回委員会報告資料：底面作業実験）

しかしながら、作業が目視検査でわからないほどのストレスを増倍管に与えた可能性は排除できないので、12本の交換球を使って再びモックアップテストを行った。本テストでは、実際の作業と比べて8倍以上に相当するストレスを増倍管群に与えた。テスト後の目視検査では何ら異常はなかった。また増倍管の1本に歪みゲージを取り付け作業によって増倍管にかかるストレスの実測を行った。最大ストレスは、作業者が増倍管直上に乗って揺すったときで、20インチから10インチに径が狭まる位置（ネック部）の円周方向に約10kg/cm²の応力が働くことがわかった。下向きの荷重によってこの部分のガラスがかなり曲げを受けていることを示している。この応力はガラスの引っ張り強度約700kg/cm²と比べると無視できるが、座屈に対してどの程度の重要性を持つかは定かでない。（資料：底面シミュレーション）

その後12本の増倍管に圧力試験（6.5気圧24時間）を行った。その結果、増倍管GJ4215が、20インチ径から10インチ径に狭まる部分（ネック部）の円周に沿って破断した。増倍管の軸方向にストレスがかかったことを示唆している。（資料：割れ球）

以上の試験結果から、底面作業によって印加されたストレスで高水圧下にある増倍管が破断し爆縮した可能性がある。

（9）結論

スーパーカミオカンデの水圧下に5年あった増倍管及び数年間暗所に保存してあった増倍管の強度を圧力試験等を行って調べた。試験本数が少ないが、使用環境または保存環境によるガラスの劣化は見られなかった。

12本の交換球を使って底面作業のシミュレーション（実際の作業と比べて約8倍以上の加重、衝撃を増倍管にかけた）を行ったところ、そのうちの1本が圧力試験（6.5気圧24時間）で増倍管ネック部の円周上で破断した。増倍管の軸方向縦向きに荷重がかかったことを示唆する割れ方である。

交換球の精密な目視検査を行ったが、1本の増倍管の光電面がかなり色落ちしておりASSY付近に微少なクラックが入っていること、その外側にあるポリエチレン熱収縮チューブ上に何かに当たったと思われる打痕があることを発見した。以上から当該増倍管は作業時に撃力を受けたことがわかった。

従って、事故の引き金となった増倍管の爆縮の原因は、

底面作業に伴うストレスが増倍管に残り約3気圧の水圧によって爆縮を起こした、増倍管取り付けに伴う運搬や作業で増倍管電極(ASSY)付近に微少なクラックが生じ、約3気圧の水圧によって爆縮を起こした、

の2点が考えられる。

増倍管 10850 の爆縮の可能性に関しては、上記の可能性はむしろ存在するがの可能性も捨てきれない。微少なクラックの入った増倍管は、4 気圧の水圧下においてそれほど時間がたたずに破壊に至ると考えられるからである。しかし、増倍管 10810 は改修作業時に交換されておらず、クラック等の障害を受けたとするとそれはスーパーカミオカンデ建設時である。当該増倍管は 5 年間 4 気圧の水圧にさらされ続けたことになり、5 年後の改修作業直後に破壊されたという時間的蓋然性は低いと考えなければならない。従って、増倍管 10810 が最初に爆縮したとすると上記の原因による可能性がある。

4．原因究明：衝撃波の発生と伝播

4 - 1．衝撃波

(1) 誘爆再現実験（資料：誘爆実験セットアップ、誘爆実験データ、を参照）

連鎖反応再現実験は、9 本の増倍管をスーパーカミオカンデの水槽、水深 3 0メートルに沈めることで行われた。増倍管はスーパーカミオカンデ装置と同様の配置である 70 cm 間隔で、3 × 3 の格子状に配置した。中央に位置する光電子増倍管を「最初の本」とした。「プッシャー」（資料：誘爆実験セットアップ）を遠隔操作し、その先端に取り付けた直径 6 cm の薄型円錐を発射して増倍管の首の部分に穴を開け爆縮させた。9 本球による実験は 3 回行われた。3 回とも誘爆が観測され、すべての光電子増倍管が破壊された。実験の結果の詳細は（資料：誘爆実験データ）を参照。主な結果を以下にまとめる。

衝撃波の強さはトルマリンゲージの設置場所(距離平均 1.4メートル)で約 1 . 8 MPa (0 . 45メートルの位置で約 5 . 6 MPa) である。衝撃波の時間幅(半値幅) は平均 0 . 05 ミリ秒である。

1 つの爆縮で複数の衝撃波ピークが観測される場合があった。2 つの衝撃波が観測された場合、その時間間隔は平均 0 . 3 ミリ秒である。

今回の実験では、回りの 8 本の PMT が一斉に誘爆するのではなく、ドミノ倒しのように連鎖反応が起こった。

3 回中 2 回の実験ではトルマリンゲージが立体的に配置され、そのそれぞれの観測時間のずれから、衝撃波を発生した増倍管、発生時間が同定できる。また、ひずみゲージの立ち上がり時間により衝撃波の到達時間も同定される。それらの時間連鎖の解析により、衝撃波の到来から誘爆・衝撃波の発生までに要する時間はほぼ 10 ミリから 20 ミリ秒であることが分かった。連鎖の後半で破壊された増倍管は誘爆・衝撃波の発生までに要する時間が短くなり 10 ミリ秒程度になっている。

衝撃波による破壊のパターンには何種類かあることが分かった。

イ) 衝撃波を受けた側の光電面最大径近傍からひびが入り始め、光電面全体にひびが入った後で大口径部分が潰れるように爆縮に転じる。

ロ) 衝撃波を受けた側の光電面最大径近傍からネック部分にかけてひびが入り始め、ネック部分が最初に破壊し、ネック部分がきのこ雲のように入り込

むように爆縮をはじめ。引き続きダイノード部分が強く引き上げられる。
八) 大口径以外の場所(ネック部分かステム部分か不明)が破壊され、光電面
の下降かダイノード部の上昇を伴い爆縮が始まる。

などである。

(2) シミュレーション結果

前回の調査委員会では増倍管の形状を球形とした、簡易シミュレーションの結果を報告した。今回は2つのシミュレーションの結果を得ている。それらは、

前回示したシミュレーションでは扱われなかった蒸気圧の振る舞いを含めた、熱力学的により現実的なシミュレーション(東京大学、松本グループ(資料:シミュレーション2、衝撃波))、

前回のシミュレーションと方法は同じであるが、現実の形に近い増倍管形状を入れたもの(三井造船、(資料:シミュレーション3))、

である。衝撃波の強さに関しては、ピークが非常に鋭いためピークの絶対値の比較は精度が悪いので直接の比較の対象としなかった。結果をまとめると、

衝撃波の深さ依存性は、熱力学的に正しい取り扱いをすると、外圧の1.9乗に比例する。(資料:シミュレーション2、衝撃波)

破壊から衝撃波発生までの時間はシミュレーションのモデルにあまり依存せず、ほぼ10ミリ秒である。この値は前回のシミュレーションの結果とも一致している。(資料:シミュレーション2、シミュレーション3)

増倍管の形状を入れた場合、衝撃圧が約3割減少している。また、複数の衝撃波の発生がみられた。それらの時間間隔は、0.1から0.3ミリ秒である。

(3) シミュレーションと再現実験との比較

シミュレーションによると爆縮開始から衝撃波発生までの時間は個々のシミュレーションには依存しない値、約10ミリ秒を与えている。データによると衝撃波の到来から衝撃波の発生まで10ミリ秒から20ミリ秒と広く分布している。しかし、連鎖の後半は10ミリ秒のところに分布している。連鎖の後半の増倍管はすでに一度以上衝撃波に打たれているものであり、新たな衝撃波の到来により直ちに構造破壊を起こすという可能性がある。この場合はシミュレーションの値と一致していることは自然である。シミュレーションから予想される10ミリ秒より、連鎖最初のころの増倍管の破壊は平均5ミリ秒長い。これは衝撃波の到来からガラスの構造破壊に至るまでに要する時間と解釈することもできる。

データによると複数の衝撃波が発生したと思われるものがある。これは、球形では見られず、増倍管の形状を入れたシミュレーションで見られたものと一致している。2つの衝撃波間隔もデータとシミュレーションではよく一致している。

衝撃波の圧力は実際に観測されたものよりシミュレーションがいずれも大きい。これは、シミュレーションに取り入れるのが難しい、ガラス等の物質の存在による違いが影響している可能性もある。

(4) 結論

1 本の増倍管の爆縮に伴う衝撃波の発生で、増倍管の連鎖破壊が起こるということが証明された。衝撃波が到来してから自身が衝撃波を発生するまでの時間は10から20ミリ秒である。衝撃波に関する実験結果とシミュレーションは、衝撃圧の絶対値を除いて、良い一致をしている。

4 - 2 . 水流等による機械的連鎖破壊

第1回調査委員会報告書に於いて、連鎖反応の可能性として、最初の増倍管の爆縮時に発生する引き込み水流や衝撃波等により、隣接する増倍管が激しく揺られ締め付けバンド近辺に生じるストレス、クラックや、増倍管相互の衝突等により機械的に破壊されていた可能性もあった。その後の検討により、そうした可能性はないことが以下の理由により明らかになった。

爆縮のシミュレーションによると、隣接増倍管位置での引き込み水流は、約1 m/秒である。爆縮の時間スケールは10ミリ秒であるから、その間の変位は高々1 cmである。増倍管の取り付けは強固でなく1 cmの変位は吸収できる。したがって、この水流によりバンド部にストレスができたり、隣とぶつかりあったりすることはない。

水流による力は $F = C_D \cdot S \cdot \rho \cdot u^2 / 2$ である。 $u = 1 \text{ m/s}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.2 \text{ m}^2$ (増倍管の断面積相当), $C_D = 1$ (形状による因子: 1が最大値)を用いると100 Nである。増倍管には60 kgの浮力がかかっていることを考えると100 Nの力は問題にはならない。

破壊実験のとき撮影されたビデオによると、光電子増倍管がどこかにぶつかって壊れたという様子は観測されていない。

以上のことにより、機械的破壊による連鎖の可能性はないと結論される。

5 . 今後の対策について

今後スーパーカミオカンデの再建が可能となったと仮定して、今回のような事故を2度と起こさないようにするための対策について記述する。上記の事故原因の究明を元に今後の対策を考える。まず、作業手順を改良して増倍管にストレスを与えない方策を採ることが第一。次に、増倍管の破壊が衝撃波を発生しその衝撃波がさらに増倍管を破壊するという最悪の連鎖反応を防がなければならない。

(1) 作業手順の改良

増倍管を扱う作業において打撃等ストレスを極力与えない作業手順を考案すること、及び作業を見守る監督員の存在が重要である。監督員は研究者とし、常に増倍管の目視検査を行い、増倍管の異常を発見するようつとめること、ストレスがかかったと思われる場合にはその大きさ等を評価できること、ストレスの大きさによっては増倍管の廃棄までを決断できること、が必要である。スーパーカミオカンデ建設時の作業手順とその改善策を(資料: 手順改良)に示した。

(2) 衝撃波防止ケース

現在の増倍管はガラス形状が複雑であるため高い耐水圧は望めない。従って、印加

されたストレス等により4気圧程度の水圧で破壊する可能性がゼロではないので、万が一爆縮しても衝撃波を絶対に発生させない方策を採らなければならない。そこで、増倍管をケースで完全に覆うことを考えた。ただし、ケースで水圧を持たせようとすると、ケースの経年変化を新たに考えなければならず、またケースを透過するチェレンコフ光が効率よく増倍管の光電面に到達できるように工夫しなければならない。この新たな問題は、ケースにいくつかの小孔を開けケース及び増倍管の隙間に周囲の純水を充満させることで回避することができる。ケースには当然差圧がかからず水圧による経年変化を心配する必要がない。万一増倍管が爆縮したとき、ケース内の純水は増倍管体積と比べて少量のため衝撃波を発生せず内部は一瞬真空になる。ケースに開けた小孔は、真空状態になったケース内部に時間をかけて（数秒以内）純水を注入する。注水はゆっくり行われるため衝撃波は発生しない（小孔による水流の速さ等は、資料：小孔、参照）。ケースは注水中の数秒間外圧を受けるから、この外圧（水圧）に耐える設計をしなければならない。しかし、常時外圧にさらされるよりも強度的にはずっと楽である。無論、増倍管の受光面およびその近傍は透明度のよいプラスチックでなければならない。紫外線透過型アクリルが最適で、水中における経年変化も無視できる（資料：アクリル）。この基本的概念を元に3案のサンプル作成を考えている。それぞれの概念図を（資料：サンプル1、サンプル2、サンプル3）に示した。スーパーカミオカンデ排水前にサンプルの実証試験を行い、最終的にどれを採用するかを決定する。

ただし、水深が高々3mの上面に衝撃波防止ケースを取り付ける必要性はあまりない。シミュレーション計算によると発生する衝撃波の圧力は外気圧の約1.9乗に比例するから、上部（1.3気圧）における衝撃波の圧力は底部（5気圧）に比べて約8%（1.5気圧）にしかならず、隣接増倍管への危険がなくなるからである（資料：衝撃波）。しかし、光電面前面のアクリル面はチェレンコフ光透過特性の一様性を確保するため、上面においても取り付ける必要がある。

（3）高耐水圧増倍管の開発

新しい高耐水圧増倍管を開発し採用する。衝撃波のシミュレーションによれば、70cm間隔で置かれた隣の増倍管に及ぼす圧力パルスは130気圧×0.1ミリ秒であるから、増倍管の耐水圧を200気圧以上に設計すれば、そもそも爆縮が起きないし、万が一起きても隣の増倍管が破壊されることはない。われわれは、本事故とは無関係に平成13年度からこの種の増倍管の開発に着手している。増倍管の形状は真球としガラス厚は約7mmとする。この球に座屈を起こさせる限界圧力は270気圧となり、200気圧以上という要求を十分に満足する。今後、電気的特性も含めて早急に開発を終えたい。

スーパーカミオカンデの完全復旧には現在使用しているR3600-5を新たに購入し衝撃波防止ケースを取り付けて使用する予定であるが、復旧途中にこの新型増倍管の開発が完了すればその導入を図りたい。

新型増倍管の概念図を（資料：新增倍管）に示す。

6 . 結論

- (1) 今回の事故は、まず底面にあった増倍管（改修時交換球 1 0 8 5 0 または非交換球 1 0 8 1 0 ）が爆縮し衝撃波が発生、その衝撃波が隣接する増倍管を破壊しさらに衝撃波を発生する、という一連の連鎖反応によって起きたものと考えられる。
- (2) 最初の爆縮球は、改修時の底面作業の際受けたストレスによりネック部の強度が弱まり、水深 3 0 m の水圧により破断したか、あるいはスーパーカミオカンデ改修時に A S S Y 部等に損傷を受けた増倍管が水深 3 0 m の水圧で破断した可能性がある。
- (3) シミュレーションによると、衝撃波は約 5 0 c m 離れた隣の増倍管のガラス部位置で、だいたい、0 . 0 5 ミリ秒、1 3 0 気圧のパルスとなって到着する。ただし、これらの値はシミュレーションの詳細に依存する。
- (4) スーパーカミオカンデ底部において事故当時と同じ条件で衝撃波発生・伝播の再現実験を行ったところ、増倍管爆縮による衝撃波が隣接増倍管を破壊することが確かめられた。

以上の事故原因を元に、今後 2 度と同様の事故を起こさないためには、

- (1) 増倍管取り付け時にストレスを与えないよう作業手順を改良するとともに作業監督要員を置く、
 - (2) 万が一増倍管の 1 本が爆縮しても連鎖破壊がおきないように、増倍管を衝撃波防止ケース内に格納する、または、衝撃波に耐えられる強度を持った新しい増倍管を開発して使用する、
- という対策がある。特に衝撃波防止ケースの採用に関しては実証テストを行った後決定する。

資料

(1)	フロー :	5 ページ
(2)	地震 :	1 4
(3)	岩盤 :	4
(4)	タイベック :	8
(5)	ダイノード :	2
(6)	ライニング :	7
(7)	ソナー :	3 4
(8)	岩盤強度 :	4
(9)	履歴 :	2
(1 0)	アンケート 9 本 :	1 0
(1 1)	アンケート建設 :	3
(1 2)	アンケート改修 :	6
(1 3)	1 0 8 5 0 :	1 4
(1 4)	1 0 8 1 0 :	2 4
(1 5)	目視 交換球 :	1 7
(1 6)	圧力等 :	4
(1 7)	ガラス試験 :	4
(1 8)	クラック履歴 :	5
(1 9)	目視 ストック球 :	2
(2 0)	トルク :	4
(2 1)	底部浮上 :	1 3
(2 2)	底面作業理由 :	7
(2 3)	底面シミュレーション :	1 1
(2 4)	割れ球 :	8
(2 5)	衝撃波実験 セットアップ	1 0
(2 6)	誘爆実験データ	1 5
(2 7)	シミュレーション 2	2
(2 8)	衝撃波 :	1
(2 9)	シミュレーション 3	6
(3 0)	手順改良 :	1 5
(3 1)	小孔	6
(3 2)	アクリル	8
(3 3)	サンプル 1 :	3
(3 4)	サンプル 2 :	8
(3 5)	サンプル 3 :	1
(3 6)	新增倍管 :	5