

特集：溶接構造物の破壊防止 - アレスト性

## LNG タンクにおける亀裂伝播停止試験

株式会社 IHI 技術開発本部  
猪瀬 幸太郎

### 1. LNG タンクの概要

液化天然ガス (LNG) タンクの構造形式や溶接技術は WE-COM マガジン No.16 で紹介した。構造形式には大別して地上式と地下式があり、前者においては亀裂伝播停止特性を設計要件とする事がある。この地上式タンクであるが以前は内槽 (9%Ni 鋼) と外槽 (炭素鋼) とで構成する自立型金属二重殻地上式タンク (以下、金属二重殻 LNG タンクとする) が多く建設された<sup>1)</sup>。ただし外槽は貯液機能が無くタンクの周囲に防液堤が必要であり土地の有効利用という観点では不利であった。そこで現在では外槽が防液堤の機能も有する PC (Pre-stressed concrete) 構造が主流となっている (以下、PC-LNG タンクとする)。この形式の外槽は内面に軟鋼 (炭素鋼) を配材した PC 製防液堤である。万が一内槽から LNG が漏洩しても外槽は液荷重や温度荷重に耐えるように設計する<sup>2)</sup>。その構造を図 1 に示す。一方 PC-LNG タンクの内槽は 9%Ni 鋼製 (もしくは 7%Ni 鋼製) であり、ここでも特に安全に特に配慮した設計施工を行う。特に国内では亀裂伝播停止性能が求められる事が多く、その性能を確認する亀裂伝播停止試験もよく行われる。

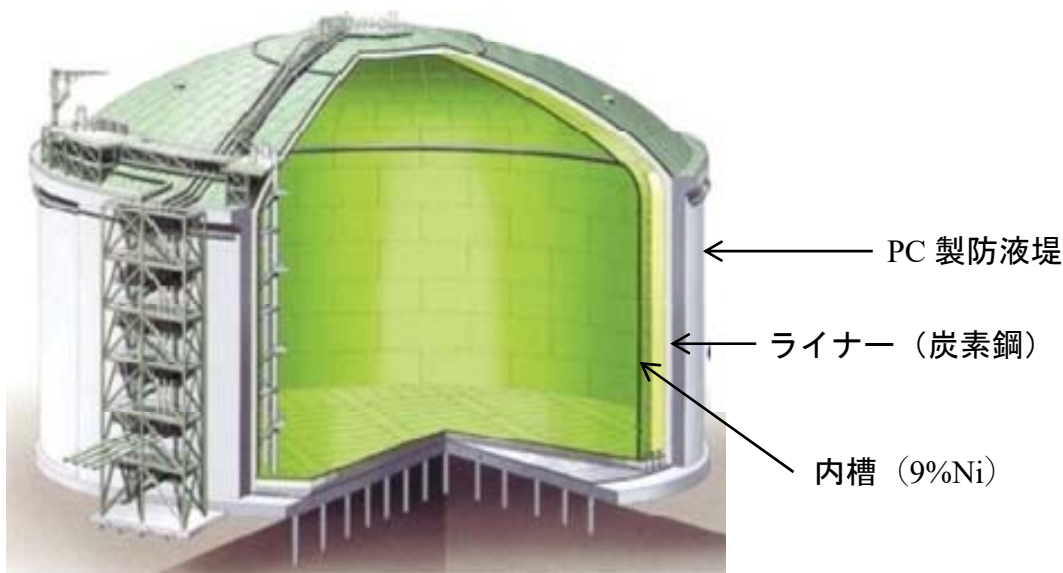


図 1 防液堤をタンク本体に密着させた PC (Pre-stressed concrete) 構造

### 2. LNG タンク内槽のじん性設計

LNG は極低温 (-163℃) であるため内槽の安全性確保は特に重要であり、そのための設計思想として二重の安全設計がある。まずは大規模破壊に至る亀裂を発生させない事、そして万一亀裂が発

生しても停止させる事が基本となる<sup>3,4)</sup>。地上式 LNG タンクにおける想定亀裂寸法（初期欠陥の想定）とねらい亀裂停止位置（亀裂を停止させる位置）の概念を図 2 に示す。

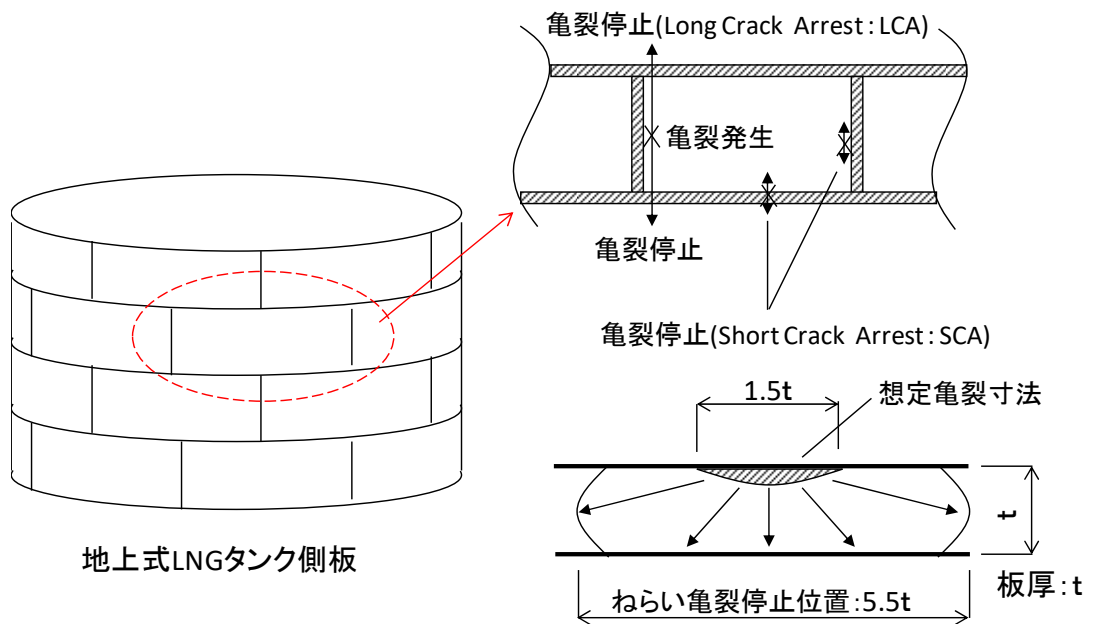


図 2 亀裂発生防止における想定亀裂寸法

まずは継手じん性設計において想定した亀裂が存在しても、それを起点としたぜい性亀裂が発生しないレベルのじん性を要求する。その指標として CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 値を用いるが、その材料試験の要領を図 3 に示す。溶接継手を対象とする試験では溶接金属、ボンド、HAZ それぞれの破壊じん性を評価する。要求する限界 CTOD 値は応力や継手施工の許容誤差（目違い、角変形）などを考慮に入れ WES2805 によって算出する<sup>5)</sup>。この手法は工業的に利便性が高く、実績も多い。

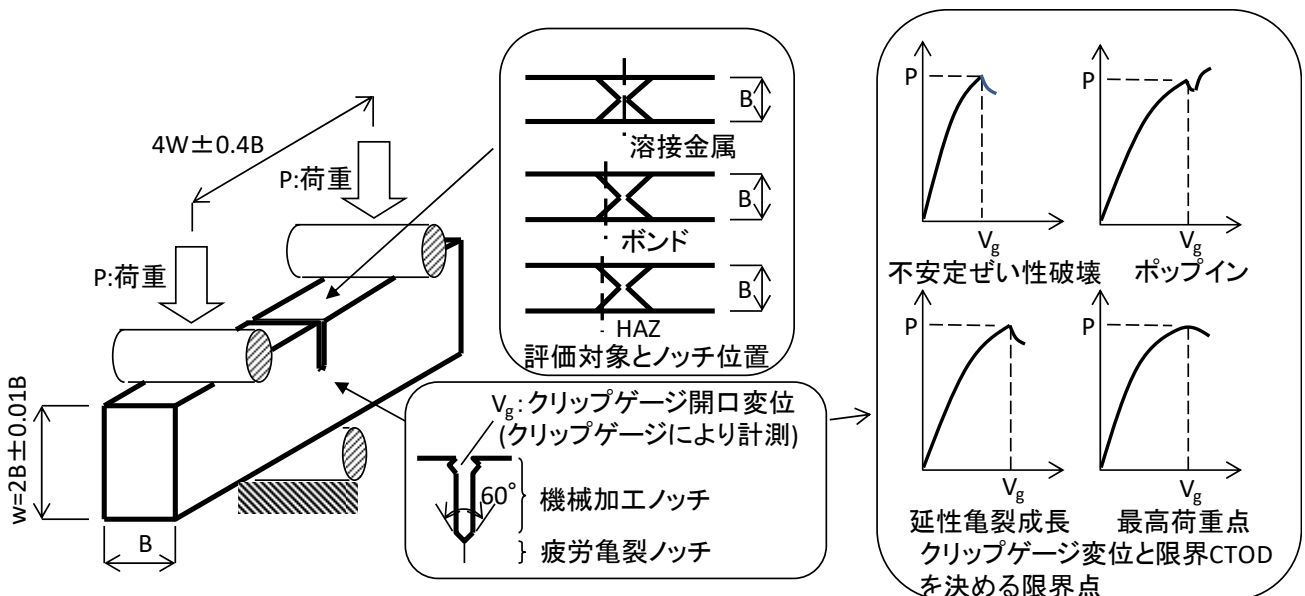


図 3 CTOD 試験要領

万一、亀裂が発生した場合は溶接部で短く停止させる“ショートクラックアレスト (SCL)”によって大規模漏えいを防止する。その許容できる亀裂進展の限界長さは板厚の 5.5 倍（貫通亀裂）までとされている<sup>6,7)</sup>。溶接金属は 70%Ni 系合金であり、降伏耐力は母材のそれより小さく、じん性は極めて高い。そのため HAZ で生じた亀裂が溶接金属に逸れて、そこで停止すると想定されている。その性能を亀裂伝播停止性能試験によって確認する。

### 3. 亀裂伝播停止性能の評価試験とその留意点

図 4 に母材、溶接継手それぞれについて、亀裂伝播停止性能試験要領を示す。試験温度は LNG 温度であるが、区切りの良い-165°Cまで供試体を冷却する事が多い。冷却の後、供試体の公称応力が設計で想定した応力と等価の荷重を载荷し保持する。その後ぜい化板（助走板）に打撃を与えるると亀裂が発生してぜい化板を伝播して供試鋼（もしくは供試継手）に突入する。試験後は亀裂の伝播経路や距離など、亀裂の性状を確認する。LNG タンクにおける試験では亀裂が板厚の 2 倍以内で停止すれば前述の“板厚の 5.5 倍の長さの貫通亀裂”相当以下と見做し、“停止”と判定する<sup>6,7)</sup>。

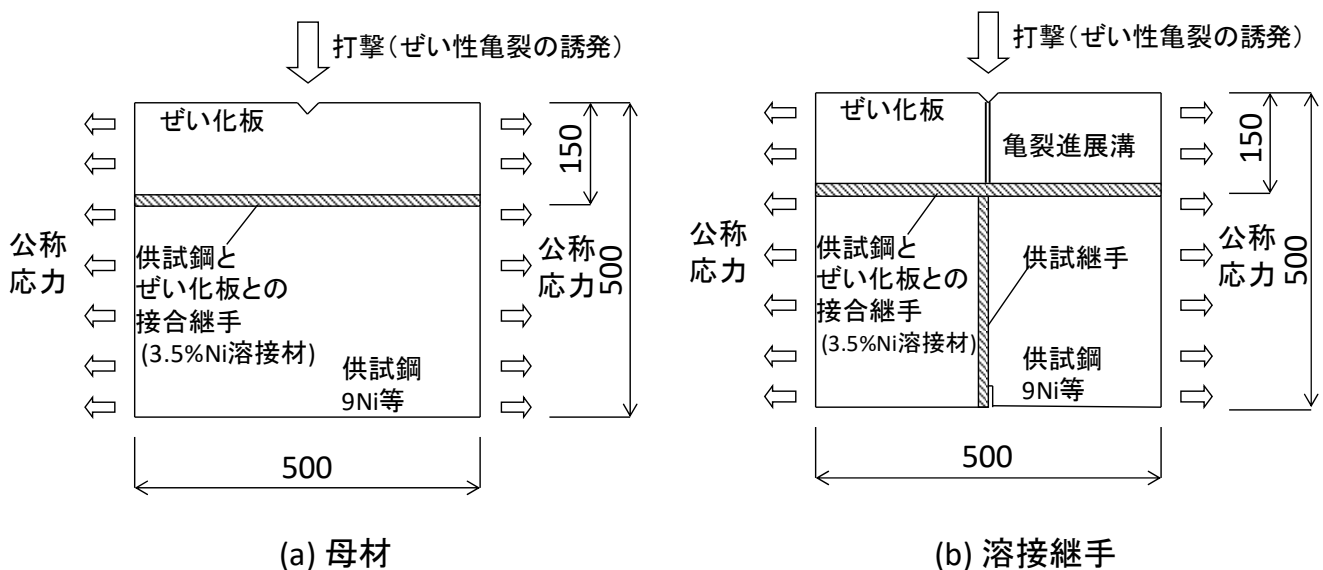


図 4 亀裂伝播停止特性試験供試体と試験

図 5 に亀裂伝播停止特性試験载荷要領および計測項目と位置を示す。供試体の製作ではぜい性亀裂を発生させるぜい化板の製作方法及び供試鋼（継手）との溶接施工が重要となる。ぜい化板のじん性が高すぎると打撃を与えても亀裂が発生せず、低すぎると所定の公称応力を導入する前に亀裂が発生する。いずれの場合も試験として成立しない。試験温度が比較的高く、供試体サイズが大きい場合は打撃を与えるノッチ底のみを急冷すればぜい化板のじん性が高くても亀裂を誘発できる。しかし LNG タンクにおける供試体サイズは□500mm×500mm であり、かつ試験温度も低いのでこの手法は使えない。ぜい化板のじん性を精度よく調整する必要があり、ぜい化のための熱処理やその確認方法は実験実務者の重要なノウハウとなっている。

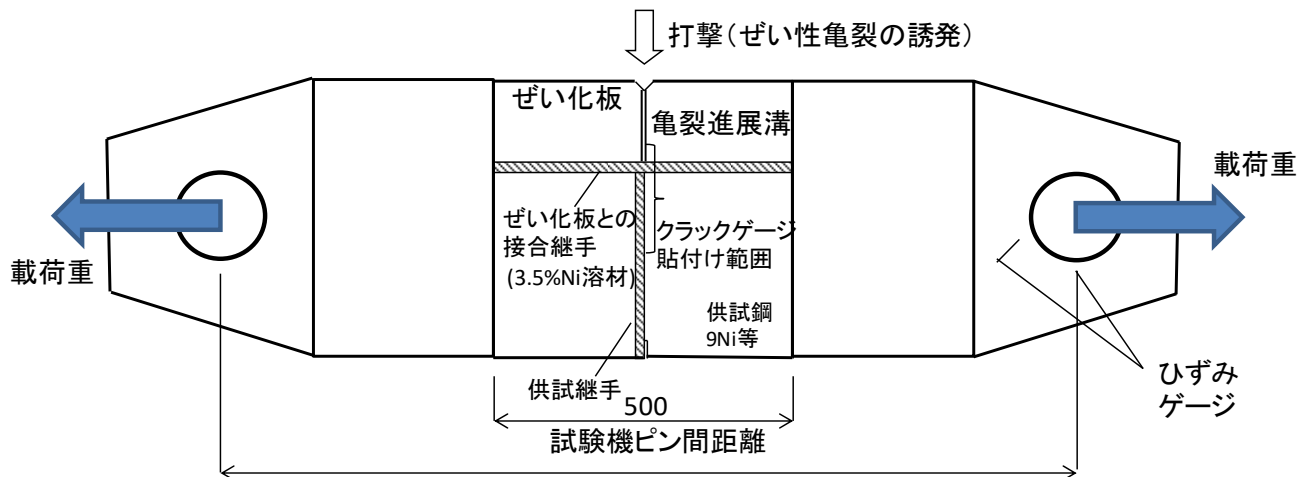


図5 亀裂伝播停止特性試験载荷要領および計測項目と位置

ぜい化板と供試鋼（継手）の接合は 3.5%Ni 溶接材料を用いるが、溶接パスの置き方によっては再熱によってじん性が向上し、亀裂は供試板に突入する前に減速する場合がある。またブローホールのような溶接欠陥も位置、形状、寸法によっては亀裂停止要因となる。そこで突入前に亀裂が減速していない事の確認をする。亀裂伝播経路にクラックゲージを貼付して亀裂速度を計測するが、その適切な値についての議論はあまりなされておらず、例えば文献 8)、9)など既存の知見を参考に実施者がその都度所用値を決めている。

亀裂が停止したとしても供試鋼（継手）の亀裂伝播停止性能による停止なのか、供試体の破壊による载荷重の低下が原因なのかの確認も必要となる。そのため試験機の支持ピン近傍にひずみゲージを貼付し、クラックゲージによる計測結果と照合して、亀裂が停止する前の载荷重低下が無い事を確認する。このような供試体の破壊による载荷重の低下の影響を避けるには試験機のピン間距離が長い方が有利となる。文献 10)は LNG タンクに供する検討ではないがピン間距離を供試体幅の 3 倍以上と規定している。

LNG タンクにおける継手の亀裂伝播停止性能試験では、溶接金属の降伏点が母材のそれより小さい。亀裂の突入位置が継手のボンドであっても亀裂は溶着金属に逸れて停止する。継手の溶接材料が炭素鋼であれば、破面だしのための強制破断面は延性破面であり亀裂伝播面はぜい性破面となる。亀裂の先端は容易に特定できる。しかし溶接材料として 70%Ni 系合金であるインコネルやハステロイを用いる場合は炭素鋼の場合ほど亀裂先端は明確ではない。亀裂伝播長を正確に測るためには破面観察に習熟している事が求められる。

図 6 に試験後の供試体破面を示す。炭素鋼であれば亀裂先端を特定するため強制破断前に供試体を加熱し亀裂伝播面に酸化膜を生成する方法もある。しかしこれも 70%Ni の溶接金属ではさほど効果はない。実験技術的としてはさらなる工夫が必要となり実務者の重要なノウハウとなっている。

これまで述べてきたように、亀裂伝播停止性能は試験によって確証される。しかし最近では数値解析による評価も試みられている。図 7 に示すのは試験を模擬した解析であり、ぜい性亀裂の伝播とシアリップの形成挙動を考慮した破壊モデルを用いている<sup>11)</sup>。この解析例では板厚中央部をぜい性亀裂が先行して伝播する破壊形態が見て取れる。また、ここでは鋼材のじん性と延性のバランス

(特性としてぜい性破壊、延性破壊のどちらが先行する材料なのか)、こうした特性が板厚方向において異なる場合の亀裂形成挙動とマクロ的なぜい性亀裂の伝播・アレスト特性への影響も解析されている。このような検討の積み重ねによって、亀裂伝播停止の支配因子とその影響度が明らかになると期待されている。

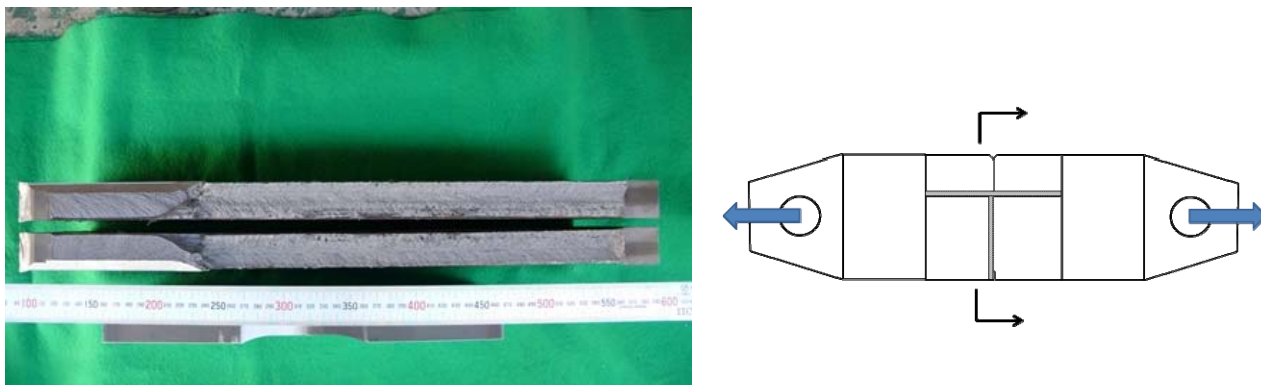


図 6 ESSO 試験後の破面の事例

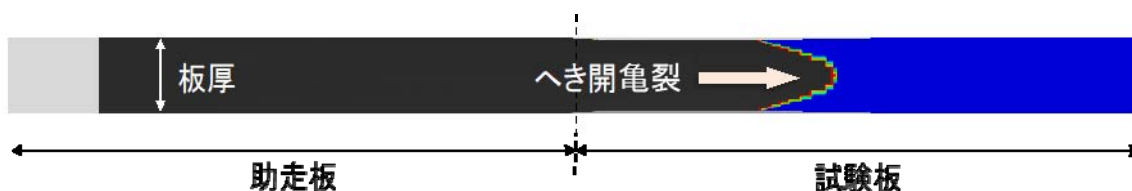


図 7 破壊モデルを用いたぜい性亀裂の伝播・アレスト挙動の数値シミュレーション結果

#### 4. まとめ

本報では LNG タンクにおける二重安全設計のための亀裂伝播停止性能試験について述べた。試験の適切な実施には専門知識と高い実験技術が必要である。試験実施に不可欠な様々な知見が実務者たちのノウハウとして蓄積されている。

#### 参考文献

- 1) 西上博之：LNG タンクの安全性評価と材料開発の動向，第 231 回・232 回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会育成委員会技術講座 WG：「破壊力学」の進展とインフラ・構造物の信頼性：安全、安心を管理するフラクチャー・コントロール，pp219-234, (2017)
- 2) 本郷進，久保尚重：特集 低温貯槽の大型化と溶接技術の動向 1 LNG 地上式貯槽の現状と大容量化，溶接学会誌，Vol.63, No.2, (1994)
- 3) 深川宗光，河野武亮，村山武弘，貝原正一郎：低温用鋼溶接部に対する要求性能とその破壊じん性，石川島播磨技報，Vol.23, No.4, (1983)
- 4) H. Miyakoshi, N. Ishikura, T. Suzuki, K. Tanaka, Experience in Japanese Gas Industry on Nine Percent Nickel Steel LNG Tanks, (1981)
- 5) 日本溶接協会：WES2805-2011，溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法 (2011)

- 6) For example, Japan Consortium 9NA Committee: Crack Arrest Properties of 9% Ni Steel and Relation between Crack-Initiation and Crack-Arrest Tests, GRI-86/0007, (1986)
- 7) 町田進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 村本聖一, 萩原行人, 有持和茂: 厚肉 9%Ni 鋼板の破壊特性と大型 LNG タンクへの適用性, 圧力技術, 第 31 巻第 1 号, pp19-33, (1993)
- 8) 秋山 俊弥, 加藤 昭彦, 渡邊 之, 川原 正言: 広幅混成 Esso 試験によるぜい性き裂伝播停止性能の評価に関する一考察, 日本造船学会論文集 Vol. 1982, No. 152, (1982)
- 9) 青木 満, 木内 晃: 9%Ni 鋼材のぜい性破壊伝ば阻止性能, 圧力技術 Vol. 21, No. 5, (1983)
- 10) 日本海事協会, 脆性き裂アレスト設計指針, p6, (2009)
- 11) 須賀, 庄司, 大畑, 一宮, 赤塚, 伊木, 滑川, 島貫, 川畑: 脆性亀裂アレスト挙動への表層高靱化効果の解析のためのマルチ破壊モデル, 溶接構造シンポジウム 2017 講演論文集, pp.61-68, (2017)

<略歴>

**猪瀬 幸太郎 (いのせ こうたろう)**

---

1993 年 金沢大学大学院 機械システム工学 修士課程修了 (機械工学専攻) 修了  
1993 年 石川島播磨重工業 (株) 入社 橋梁事業部配属  
2001 年 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部  
2004 年 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部 主任研究員  
2008 年 大阪大学大学院 工学研究科にて博士 (工学) 取得  
2014 年 技術開発本部 生産技術センター 溶接技術部応用グループ 主任研究員  
2019 年 技術開発本部 技術基盤センター 溶接グループ 部長  
現在に至る