

氏 名	古 君 修
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年 2 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 5 2 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科金属工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	低温貯槽用鋼板の破壊靱性向上に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 木村 宏 東北大学教授 桑名 武

論 文 内 容 要 旨

気体燃料の輸送、貯蔵に用いられる構造物とくに貯槽には、低温での靱性がすぐれた低温用材料が使用される。そして、対象となるガスの常圧における沸点により、用いられる低温用材料が選定される。低温用材料の主要部を占めるものは、LPGおよびLNG貯槽用である。

LPG貯槽用には、現在、0.1% C-A ℓ キルド鋼あるいは0.1% C-2.5% Ni鋼が使用されているが、ともに、溶接部での脆性亀裂発生を抑制できない危険がある。従来は、シャルピー衝撃試験による吸収エネルギーを用いて安全性が評価されてきたが、カタールでのLPG貯槽事故を契機に破壊力学に基づく評価がなされ、このことが明らかになった。

低温貯槽の安全性を確保する策として、溶接部靱性を十分高めて脆性亀裂が発生しないことを保証し、その上で、万一発生した脆性亀裂の伝播を母材で停止させることを保証するという二段の安全保証が必要であると考えた。本研究は、このような特性を備え所定の強度を有する安価な材料を開発することを第一目的とする。

まず、溶接部靱性を確保するために従来鋼の約1/10のC量を含有する0.01% C-Nb鋼を中心に実験を行った。そして、0.01% C鋼を用いることによって、溶接部靱性は十分確保できることを明らかにした。一方、母材強度、靱性を確保するために、制御圧延、制御冷却、焼入れ焼もどし処理の適用を検討した。制御圧延と焼入れ焼もどし処理を組み合わせることにより強度は確保されたが、靱性亀裂伝播停止特性、 K_{IC} が目標値である $304\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ に及ばなかった。これは、極低C化したことによるフェライト粒の粗大化、さらに、制御圧延によっても粗大化こそすれ微細化しないためである。

そこで、溶接部靱性を確保するためにC量を0.01%としたうえ、制御圧延により結晶粒を微細に

するために、 A_{r3} 点を低下させる元素の添加を考え、また、Nbによる結晶粒粗大化阻止を試みることにした。 A_{r3} 点を下げる合金元素としてCu, Mn, Niの添加が考えられるが、Cuは析出Cuによる脆性が懸念され、一方、Niは種々の低温靱性向上効果が期待されるので、Niを最小限添加することとした。Niは2.5%が最適であり、それ以下であれば靱性改善効果は小さく、3.5%まで増加すると溶接部に島状マルテンサイトが生成されるようになり脆化した。0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼では、溶体化温度を低くしてもNb (CN) の固溶が生じる。したがって、スラブ加熱温度を1223Kまで低めて初期オーステナイト粒が微細な状態から制御圧延を行ってもNbによる再結晶抑制効果が利用でき、粒径1.6 μ mの微細結晶粒が得られた。その結果、期待通り母材の低温靱性は著しく向上し、 K_{IC} の目標値である304MPa \sqrt{m} を達成することができた。

以上の基礎実験結果に基づき0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼を工場規模で製造したが、溶接部で脆性亀裂が発生しがたく、たとえ発生しても母材でこれを停止できる二段安全保証の材料であることが確かめられた。

つぎに、LNG貯槽用鋼板を取り上げた。従来、9% Ni鋼は70% Ni合金で溶接され、貯槽として用いられていた。これは、溶接部で脆性亀裂が発生しても、オーステナイト合金でその亀裂を停止させるという考えに基づく。しかし、70% Ni合金は甚だ高価であるので、かねて12% Ni鋼などフェライト系溶接材料による共金溶接が試みられていたが、LNG貯槽としての安全性は満足すべきものではなかった。本研究では、共金溶接法で施工してもLNG温度で溶接部から脆性亀裂が発生せず、たとえ亀裂が発生しても母材で完全にこれを停止できるような二段安全保証が可能なLNG貯槽用鋼板を開発することを第二の目的とした。

従来の9% Ni鋼は、0.006%以上のPと0.004%以上のSを含んでいる。まず、これらの元素を低減することによる靱性改善を意図した。なお、予備実験ではCを0.01%まで下げてみたが、Nbの有無によらず溶接部の結晶粒が粗大化し、靱性の改善が図れなかったので、Cは0.06%とした。この結果、母材および溶接部靱性ともに、期待通り著しく向上した。

この成功の理由は、Pを十分低くしたため焼もどし脆性が生じなかったこと、つまり、LNG温度でも完全延性破壊となったこと、つぎに、Sが十分低いので低温延性破壊特性が高くなったことである。さらに、制御冷却の適用により、母材の延性破壊特性の向上が達成できた。そして、特記すべき点は、従来は逆変態オーステナイトが多いほうが破壊エネルギーが高くなることが一般の常識とされていたが、9% Ni清浄鋼ではLNG温度でも完全延性破壊であるため、逆変態オーステナイトは延性破壊の起点になり、破壊エネルギーを低くすることが明らかにできたことである。つまり、逆変態オーステナイト量を少なくすることにより、従来にない低温靱性を得ることができた。

以上をまとめると、LPG貯槽用鋼板としては0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼を、LNG貯槽用鋼板としては9% Ni清浄鋼を用いるならば、二段安全保証可能であるという結果を得た。論文は5章よりなり、以下に各章について要約を示す。

第1章では、低温用鋼板の種別と用途を示し、それぞれの低温用鋼板における現在までの研究の経緯、技術水準および要求される特性を明らかにした。さらに、今後の大型低温貯槽の施工技術の動向を考慮し、改善されるべき点を指摘した。つぎに、LPGおよびLNG低温貯槽用鋼板開発に

あたり、その研究方針を述べた。

第2章では、本研究に用いた供試材、実験手法とその意義について詳細に述べた。

第3章では、まず、A ℓ キルド鋼の溶接継手ボンド部靱性に及ぼすC、Nb量の影響を検討した。その結果、C量の0.01%までの低減およびこのC量域でのNbの添加は、溶接継手ボンド部靱性を著しく改善することを明らかにした。しかし、0.01%C-0.03%Nb-A ℓ キルド鋼を制御圧延と焼入れ焼もどし処理を組み合わせる製造し、母材特性を調べた結果、脆性亀裂伝播停止特性がLPG貯槽用鋼板として不十分であることがわかった。

この点を改善するために、つぎに適正量のNiを添加することを考えた。

まず、低Ni鋼における溶接継手ボンド部靱性に及ぼすNi、CおよびNb量の関係を検討し、その結果0.01%C-0.03%Nb-2.5%Ni鋼がもっともすぐれた靱性を有することを明らかにした。この成分系は、島状マルテンサイトの低減とNiによる靱性向上効果を両立させたものである。つぎに、この成分系の2.5%Ni鋼に制御圧延および制御冷却プロセスを適用し、母材靱性、とくに脆性亀裂伝播停止特性を向上させることを検討した。その結果、スラブ加熱温度を1223Kまで下げ、圧延後の冷却速度を5K/sと大きくすることにより結晶粒が1.6 μ mまで微細化し、脆性亀裂伝播停止特性が著しく向上することが明らかになった。

以上の基礎実験を踏まえて工場規模で製造した0.01%C-0.03%Nb-2.5%Ni鋼は、大型試験などの結果から、LPG貯槽用鋼板として溶接部で脆性亀裂が発生しがたく、万一発生しても母材でこの亀裂を停止できる、二段安全性が保証可能な材料であることがわかった。

第4章では、12%Ni系共金溶接法の適用可能なLNG貯槽用鋼板の開発に関する研究を行った。まず、9%Niの鋼の溶接継手ボンド部靱性に及ぼすC、PおよびNb量の影響を検討した。その結果、(1)C量の低減は島状マルテンサイトの生成は抑制するものの、むしろ破面単位を大きくし靱性を下げるので、約0.06%含有することが望ましいこと、(2)Nb量は靱性に影響を及ぼさないこと、また、(3)P量の低減は焼もどし脆性防止の点で著しい効果がある、すなわち、とくに冷却速度が遅い溶接後熱処理の場合に粒界破壊を抑制することで靱性を改善すること、などが明らかになった。

つぎに、母材靱性に及ぼすP、S量の影響を調べた結果、(1)P量の低減は焼もどし処理時の冷却速度が小さい場合の靱性を粒界破壊を抑制することで改善すること、また、(2)S量の低減は延性破壊の発生および進展抵抗を向上させることが明らかになった。

以上の結果から最適成分系と考えられる極低P(0.004%)、極低S(0.001%)化した0.06%C-9%Ni清浄鋼を、制御圧延および制御冷却プロセスで製造することを検討した。その結果、スラブ加熱温度は1523K、圧延仕上げ温度は1223Kまで高くすると、析出オーステナイト相の減少により延性破壊エネルギーが増加できることが明らかになった。

以上の基礎実験を踏まえて工場規模で製造した9%Ni清浄鋼は、大型試験などの結果からLNG貯槽用鋼板として、12%Ni共金系材料を用いて溶接しても、溶接部で脆性亀裂が発生しがたく、また、たとえ発生しても母材でこの亀裂を停止させられる二段安全性を保証できる材料であることがわかった。

第5章では、以上の実験結果を総括した。

審 査 結 果 の 要 旨

液化石油ガス（LPG，沸点 -46°C ）および液化天然ガス（LNG，沸点 -163°C ）の輸送，貯蔵用低温貯槽はフェライト鋼で建造させるが，1977年に起ったLPG貯槽の破壊事故以来，より高い安全性が要求されるようになった。本論文は，溶接部から亀裂が発生しないことに加えて，万一亀裂が発生しても母材でその伝播が停止する二段の安全性を保証できるLPG，LNG貯槽用鋼板の開発に関する研究結果をまとめたものであり，全編5章よりなる。

第1章は緒論であり，本研究の背景，研究方針などを述べている。

第2章では，低温貯槽製造の際の現行の最も厳しい溶接条件を想定した試験片の作製や靱性測定の方法など，試料と実験方法をまとめて記述している。

第3章では，LPG貯槽用鋼板について述べている。まず現用のキルド鋼板の強靱化を種々試みた結果，二段の安全性を保証するためには，合金元素の助けが必要であるとの結論に達している。次に，C濃度を従来の10分の1としたうえで，Nbを0.03%，Niを2.5%添加し，従来の圧延温度より低温で圧延した後に加速冷却を行って組織を微細化することにより，二段の安全性を保証しうる材料が得られたことを述べている。

第4章では，LNG貯槽用鋼板について述べている。従来用いられている9%Ni鋼は亀裂伝播停止特性が悪いので，高価な70%Ni-20%Mo合金で溶接を行い，この溶接線で亀裂を停止させる方法がとられている。本研究では，P，S含有量をそれぞれ40，10ppm以下に下げた焼戻し脆性を防ぎ，延性を向上させるとともに，従来の定説では低温靱性の向上に大きな効果があるとされていた残留オーステナイトの量を極力減少させるような制御圧延，制御冷却を施すことによって，新しい型の9%Ni鋼を開発している。これは安価な11%Ni鋼で溶接しても二段の安全性を保証できることを示している。

第5章は総括である。

以上要するに本論文は，LPG，LNG貯槽用として，亀裂の発生と伝播の両面で充分な安全性を保証し得る経済性の高い鋼の開発に成功するとともに，それらの強靱化の機構を組織観察の結果を引用して明快に説明したものであり，材料加工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。