

エネルギーの動脈と静脈を担うパイプラインの設計

Design of Pipelines Comprising the Artery and Vein of Energy

栗飯原周二、柴沼一樹

Shuji Aihara and Kazuki Shibanuma

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

Dept. Systems Innovation, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

aihara@sys.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract: Outline of research on integrity and design of high-pressure pipelines at our laboratory is presented. Researches on numerical model for simulating unstable fracture, dynamic evaluation and analysis of crack resistance measurement and hydrogen embrittlement of pipeline steels are on-going subjects. Integrity and design of CO₂ pipelines for carbon capture & storage are new issues our laboratory is presently pursuing.

1 はじめに

アジアを中心とする発展途上国の急速な経済成長に伴い、世界のエネルギー消費は増加の一途を辿ると予想されている。中でも、天然ガスは石油に較べて中東に偏在していないことに加えて、CO₂排出量が少ないことから、需要増加が顕著である。さらに、シェールガス等の非在来型天然ガスの生産も増加する。

再生可能エネルギーを含む一次エネルギーの多様化に対応してエネルギーキャリアーとしての水素が注目されはじめて久しいが、水素社会実現のためには水素の利用技術だけでなく輸送技術の開発も必要である。大規模水素社会では、製鉄プラント等で生産される水素を消費地まで多量に輸送する必要がある。このためには水素ガスをパイプラインで輸送することが最も合理的である。

一方、地球温暖化ガス排出抑制のためにCO₂分離・隔離 (Carbon Capture & Storage) の研究開発が世界中でなされているが、CCSを実現するためにはCO₂の輸送技術も確立する必要がある (Carbon Capture, Transport & Storage)。CO₂パイプラインは石油回収増進(EOR)用として北米で既に 5,000km 以上稼働しているが、対象はほぼ純粋のCO₂である。これに対してCCSではCO₂に不純物ガス成分を含み、その影響は大きいので新たな技術開発が必要である。

上記のようなエネルギー輸送の動脈と静脈の大半を担うパイプラインの設計と信頼性に関して我々の研究室で実施している研究の概要を紹介する。

2 天然ガスパイプライン

上記のとおり、一次エネルギーの中でも天然ガスの需要拡大は特に大きい。わが国は天然ガスの大半を輸入に依存している。輸入天然ガスは近隣のサハラリンからの輸入も含めてすべて液化して輸送している。しかし、世界的に見ると、天然ガス輸送の大半はガスパイプラインに依っている。輸送効率向上のために高圧化とパイプライン用鋼の高強度化が進んでいる。海外では設計係数を0.7以上とした合理的な設計を行い、X80高強度鋼管も積極的に用いて輸送効率の向上を図っている。また、X100、X120超高張力鋼管の開発も完了し、実プロジェクト適用が待たれている。

天然ガスパイプラインの輸送効率向上とともに、信頼性確保は重要な課題である。高圧ガスパイプラインでは、き裂が発生しないことに加えて、万が一、き裂が発生してもき裂を早期に停止させる二重安全性設計がなされる。特に後者の高速き裂伝播の防止は重要であり、従来から研究がされてきたが、パイプラインの高圧化・高強度化に対応できる新たな評価手法が必要とされている。

当研究室では、従来の手法とは全く異なる高速き裂伝播の計算モデルを開発し、適用範囲の拡大と高精度化の研究を行ってきた。本計算モデルは、鋼管の変形・破壊とガスの減圧挙動を一次元差分方程式を連成させて解くもので、従来の経験式に基づいたモデルに必要な強度レベルによる補正は必要ない。また、大規模計算機は必要とせず、モデルの拡張も容易である。現在は、海底パイプラインへ適用する

研究を行っている。

パイプラインの高速破壊現象を予測するためには、鋼管材料の動的き裂伝播抵抗を精度よく算定する必要がある。従来から適用されている落重試験では、試験片の破壊に要する吸収エネルギーや延性破面率を尺度とするのが慣例である。当研究室で所有する落重試験機の計装化を行って動的データを取得するとともに、試験片の破壊状況を動的FEMを含む数値計算を行い、また、破面や破面直下組織のマイクロ観察を行うことにより、き裂伝播抵抗を正確に評価する手法の開発を目指した研究を行っている。

3 水素ガスパイプライン

上記のとおり、水素社会実現のためには水素パイプラインの開発が必要である。天然ガス輸送パイプラインと同様な信頼性評価に加えて、水素ガスに特有の評価が必要となる。

高圧水素ガスパイプラインの信頼性確保において検討すべき最も重要な課題は水素脆性に対する評価である。パイプライン用低合金高張力鋼の20MPa以下の圧力における水素脆化試験のデータは少ない。当研究室で実施した高強度鋼管材料の水素脆化試験において、準静的負荷では若干の延性き裂抵抗の低下が認められるものの抵抗値は高い値であった。また、動的負荷では水素によるき裂伝播抵抗の低下は認められなかった。既存の天然ガスパイプライン用低合金鋼は水素パイプラインに適用できると考えているが、水素の鋼中拡散と水素脆性の関係について継続して研究を行っている。

高速き裂伝播の防止は水素ガスパイプラインにおいても重要な課題であり、当研究室では、世界に先駆けて水素パイプラインの実大強度試験を実施した。水素ガスで12~16MPaに加圧した鋼管に他工事損傷を模擬して強制的に初期き裂を発生させ、き裂伝播挙動を計測した。その結果、き裂は1m以内の短距離で停止することを実証した。さらに、メタンガス(天然ガス主成分)の場合に比べてき裂伝播距離が短くなることも確認した。水素ガスはメタンガスに比べて減圧波が速く伝播するために、き裂発生後、早期に圧力が低下してき裂駆動力が低下することがその主な理由である。実大試験と平行して上記の高速き裂伝播数値モデルにより解析を行い、この現象を定量的に評価するとともに、き裂伝播を防止するために必要な鋼管の靱性値を算定した。この結果は将来の水素パイプラインの設計に適用できるものと考えている。

4 CO₂パイプライン

上述のとおり、CO₂輸送パイプラインはEOR用とし

て既に稼働しているが、これらのほとんどは天然CO₂で不純物ガスをほとんど含まない。これに対して、CCSでは人為起源CO₂と分離方法によって不純物ガスをより多く含む場合がある。CO₂は熱力学的に不安定な流体であり、微量ガス成分により状態図が大きく変化する。このことがCO₂輸送パイプラインの信頼性設計に大きな影響を与える場合がある。特に、パイプラインの損傷によりCO₂が漏出した場合の減圧が遅くなり、高速き裂伝播を生じやすくなる可能性があり、注意が必要である。不純物ガス成分による状態図の変化とそれに伴う減圧挙動と高速き裂伝播を連成させた解析によりCCS用CO₂パイプラインの高速き裂伝播制御のための必要靱性を評価する手法を開発する必要があり、研究を進めている。

枯渇天然ガス田をCO₂隔離サイトに利用する場合、既存の天然ガスパイプラインを用いてCO₂を逆輸送することが考えられる。この場合、天然ガス輸送用として強度設計されたパイプラインをCO₂輸送用に再設計する必要がある。き裂伝播制御に対してはクラックアレスターの適用が有効である。当研究室では、高圧ガスパイプラインのクラックアレスター設計に適用できる数値モデルを開発中であり、CO₂パイプラインへの応用を考えている。

EORとは異なりCCSそのものは利益をもたらさないので、極限の輸送コスト低減を図る必要がある。既存のパイプラインを再利用するのもひとつの方法であるが、CO₂パイプライン網の最適化により輸送延長の最小化や分離・隔離の集約等により総輸送コストを低減することを考えるべきであり、当研究室でもこれに関係する調査を行っている。

5 おわりに

以上、当研究室におけるエネルギー輸送パイプライン分野における研究の概要を述べた。本稿とともにポスター展示を参照されたい。また、ご興味をお持ちの方は、研究室ホームページも参照いただきたい。

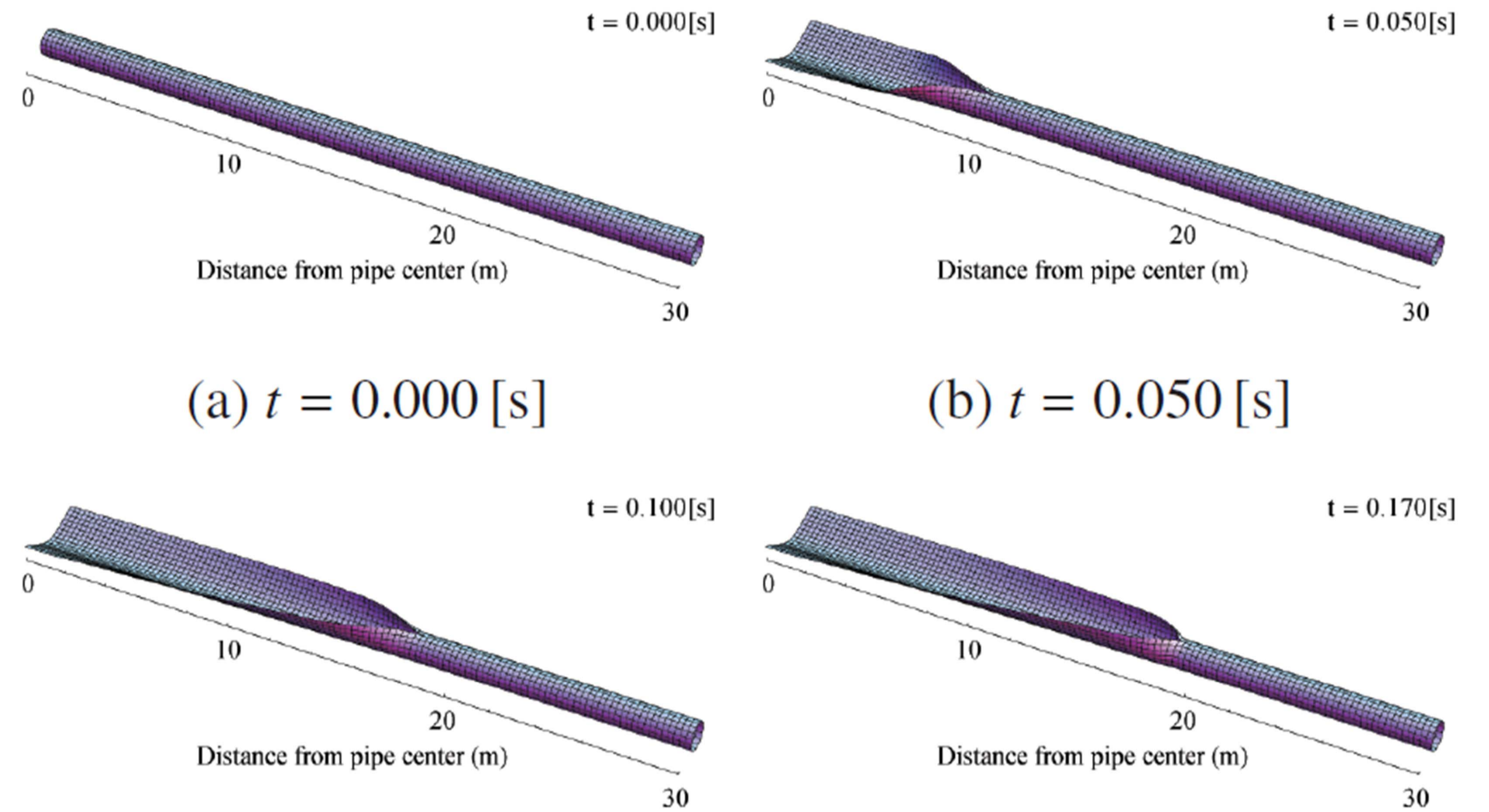
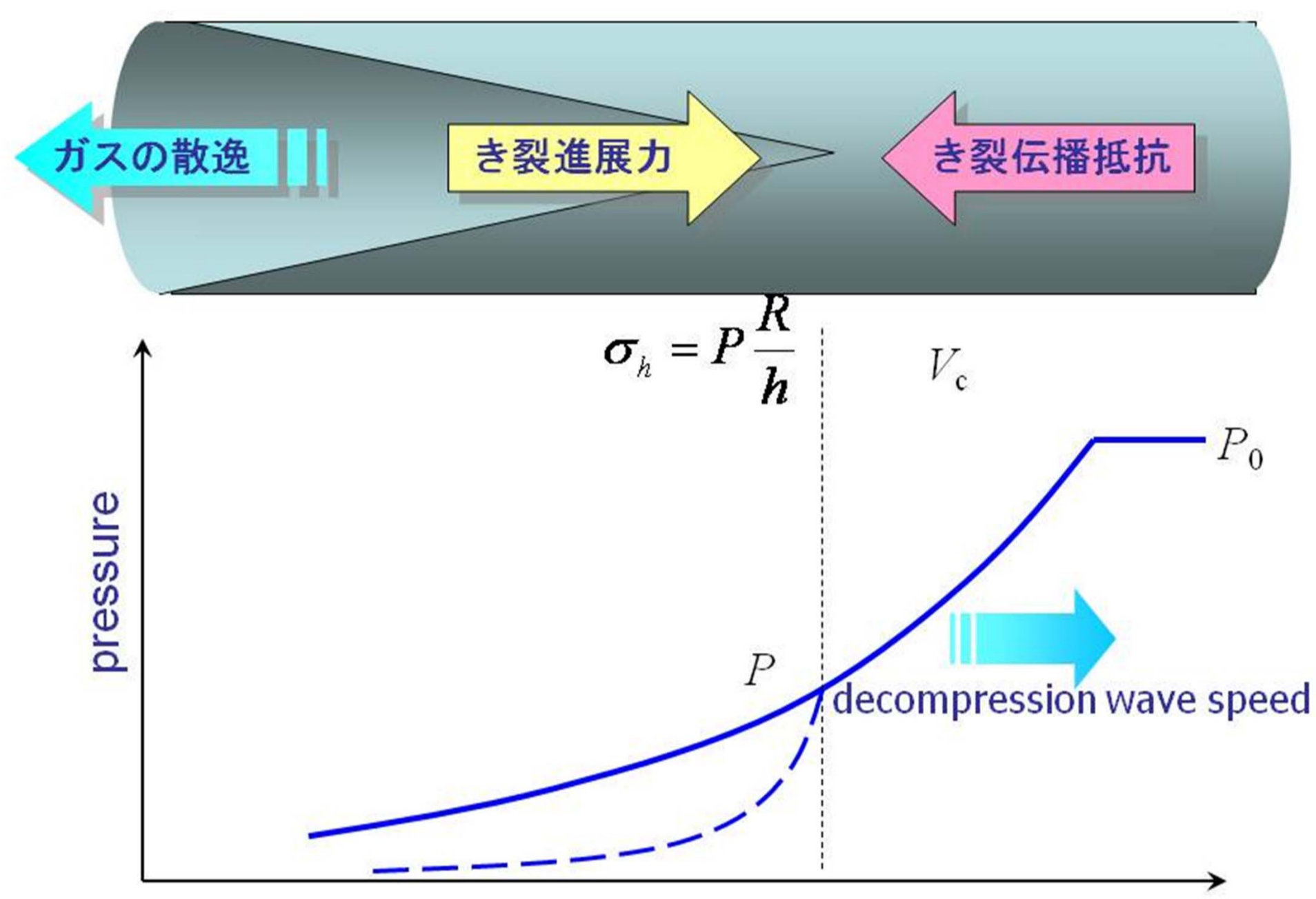
<http://sunshine.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/aihara/>

低炭素社会実現のための エネルギーの動脈と静脈を担う パイプラインの設計<栗飯原研究室>



水素パイプライン実大試験 2009年8月, Norway

◆天然ガスパイプライン



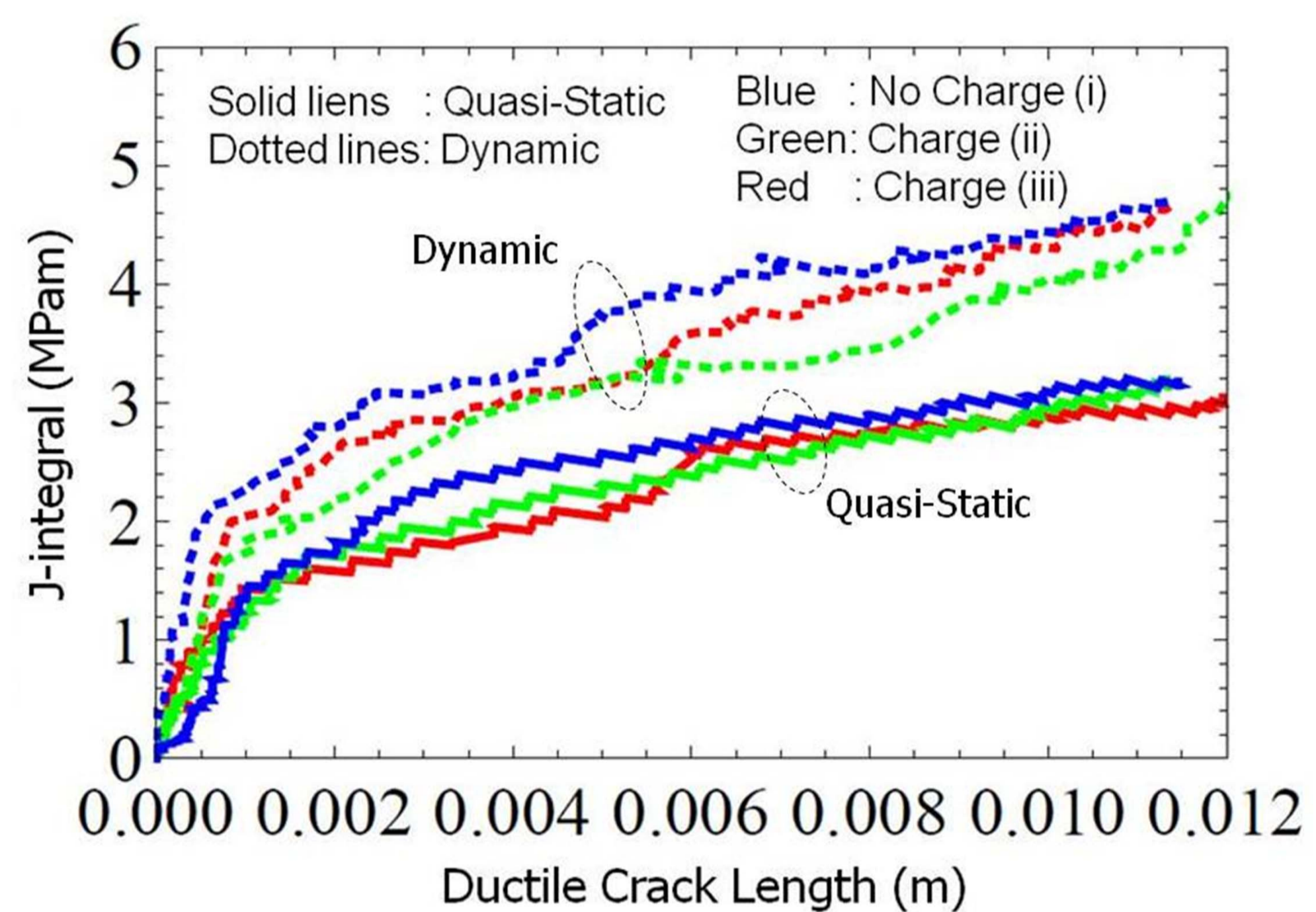
・内部流体とパイプの動的破壊現象を連成したシミュレーションモデルを独自開発

◆水素ガスパイプライン

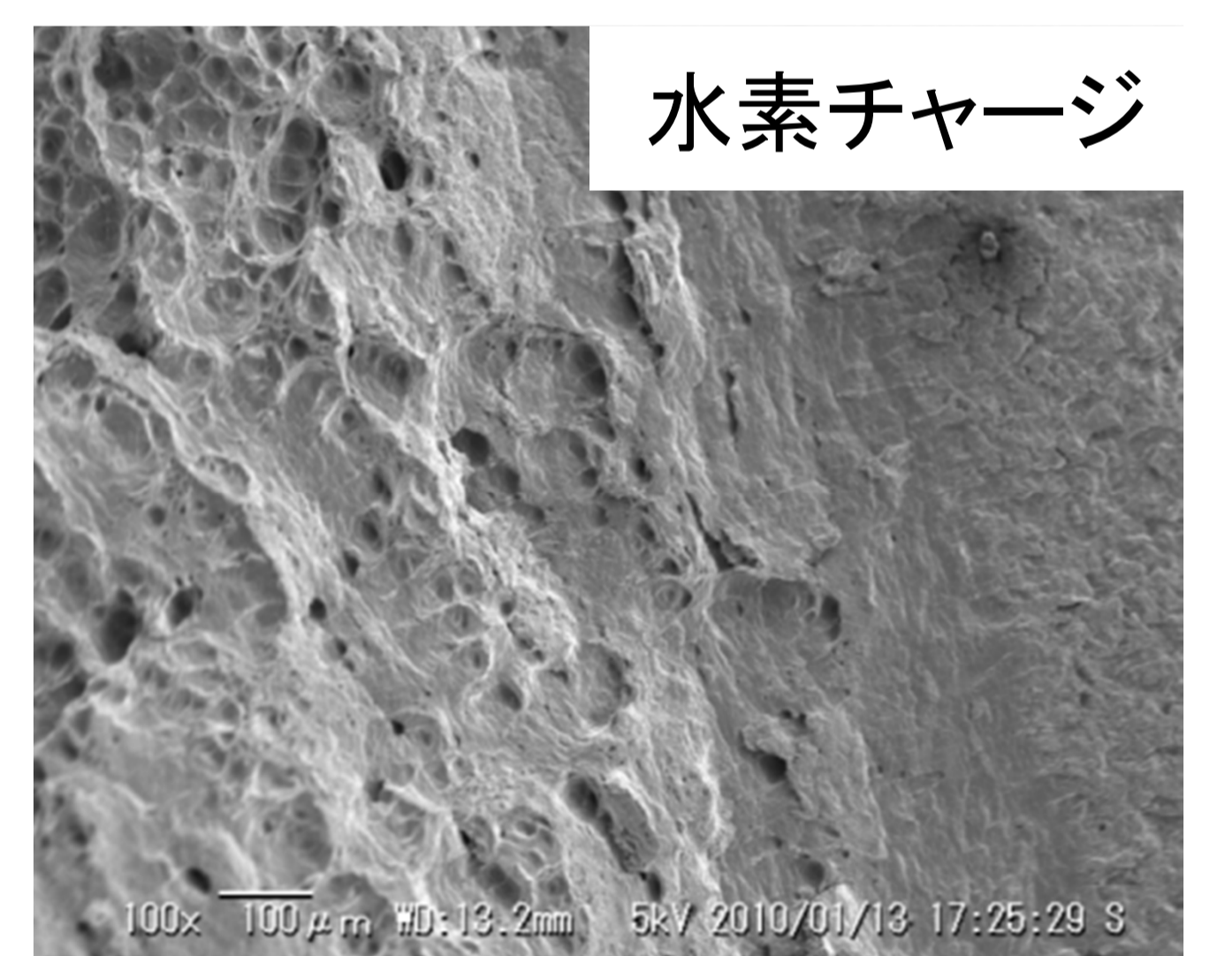
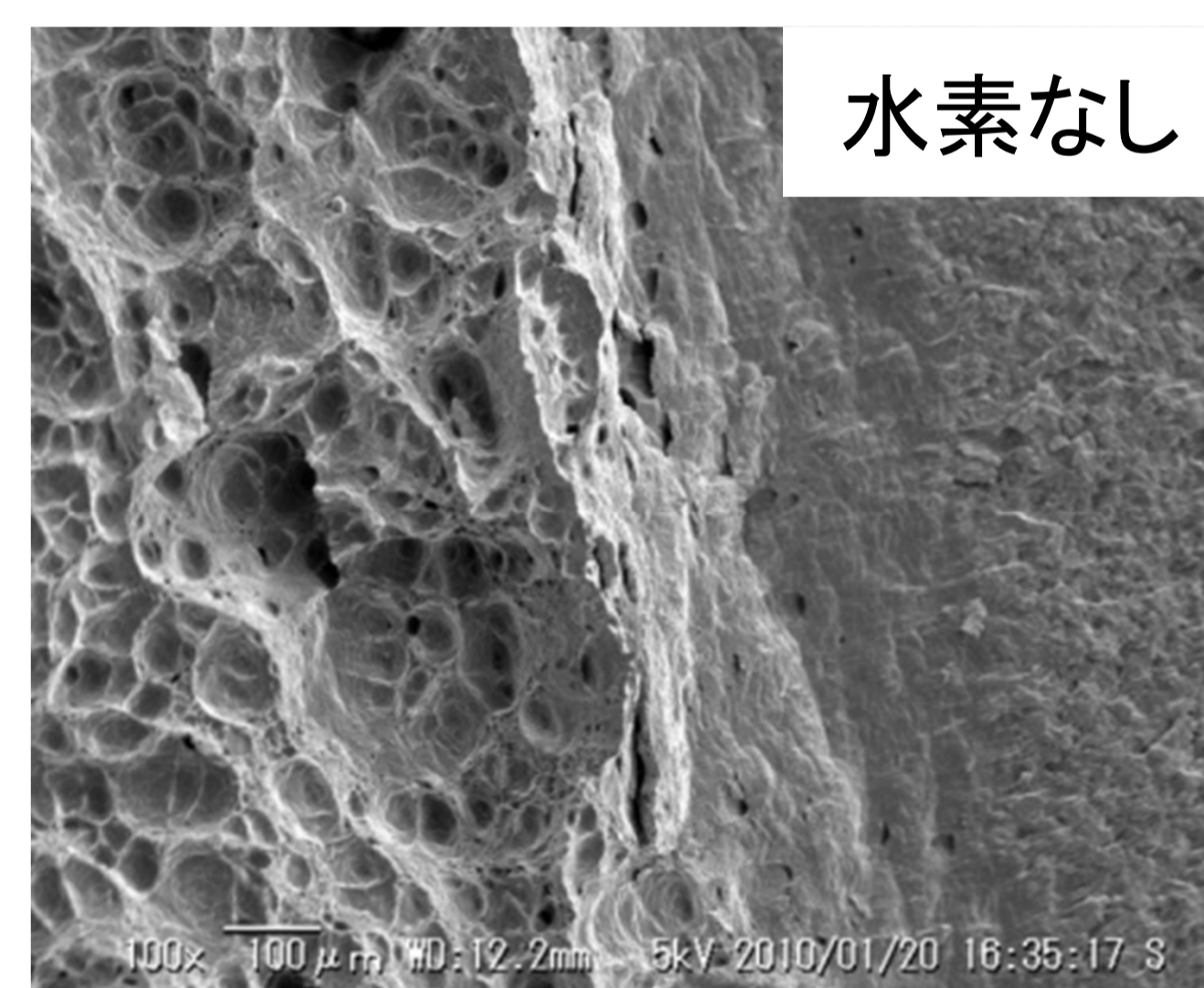


- ・大規模破壊に発展しないことを実証
- ・天然ガスパイプラインよりも安全(数値モデルで定量評価)

世界初の水素パイプライン強度試験をノルウェーで実施 (2007・2009)

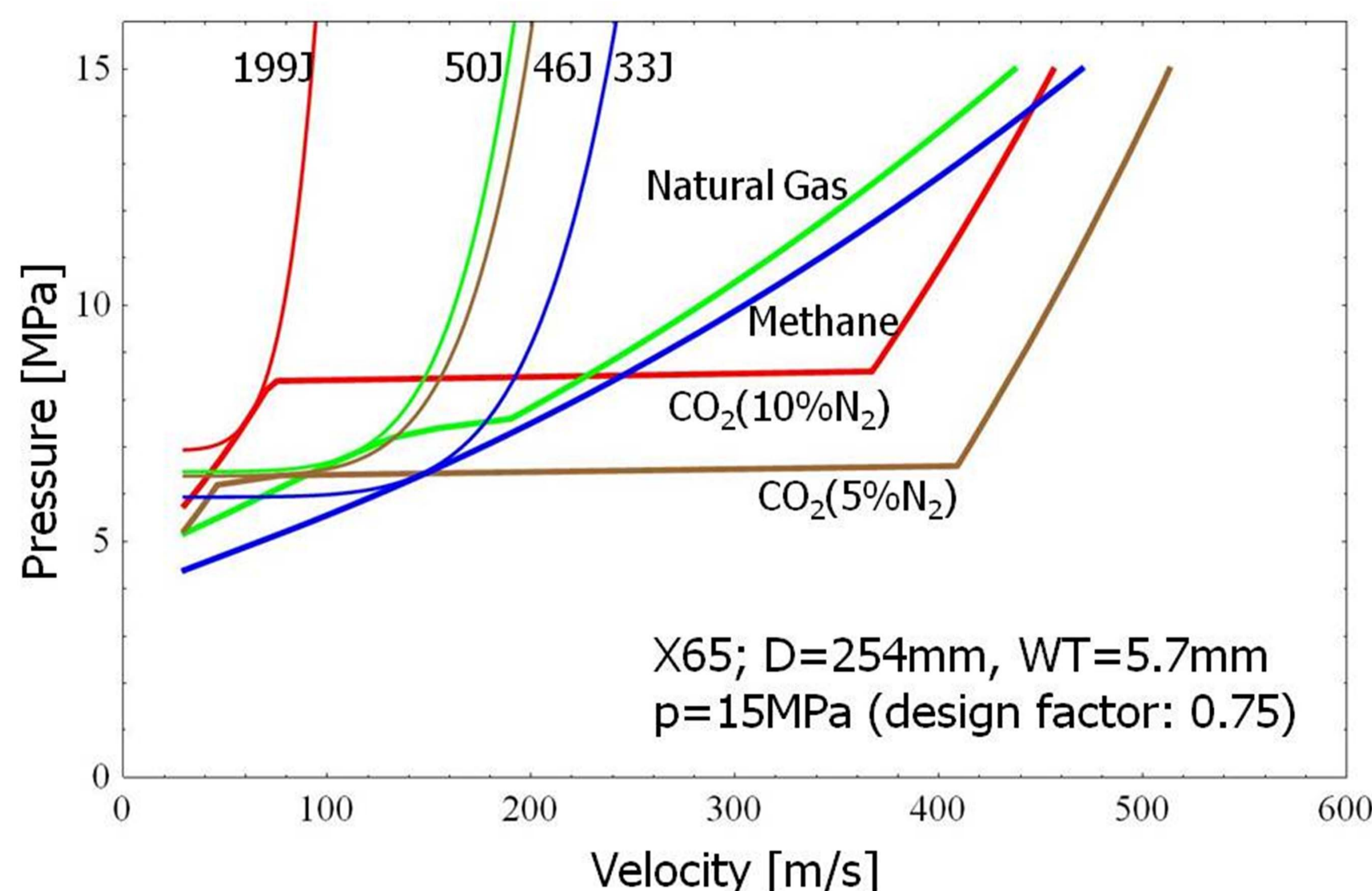
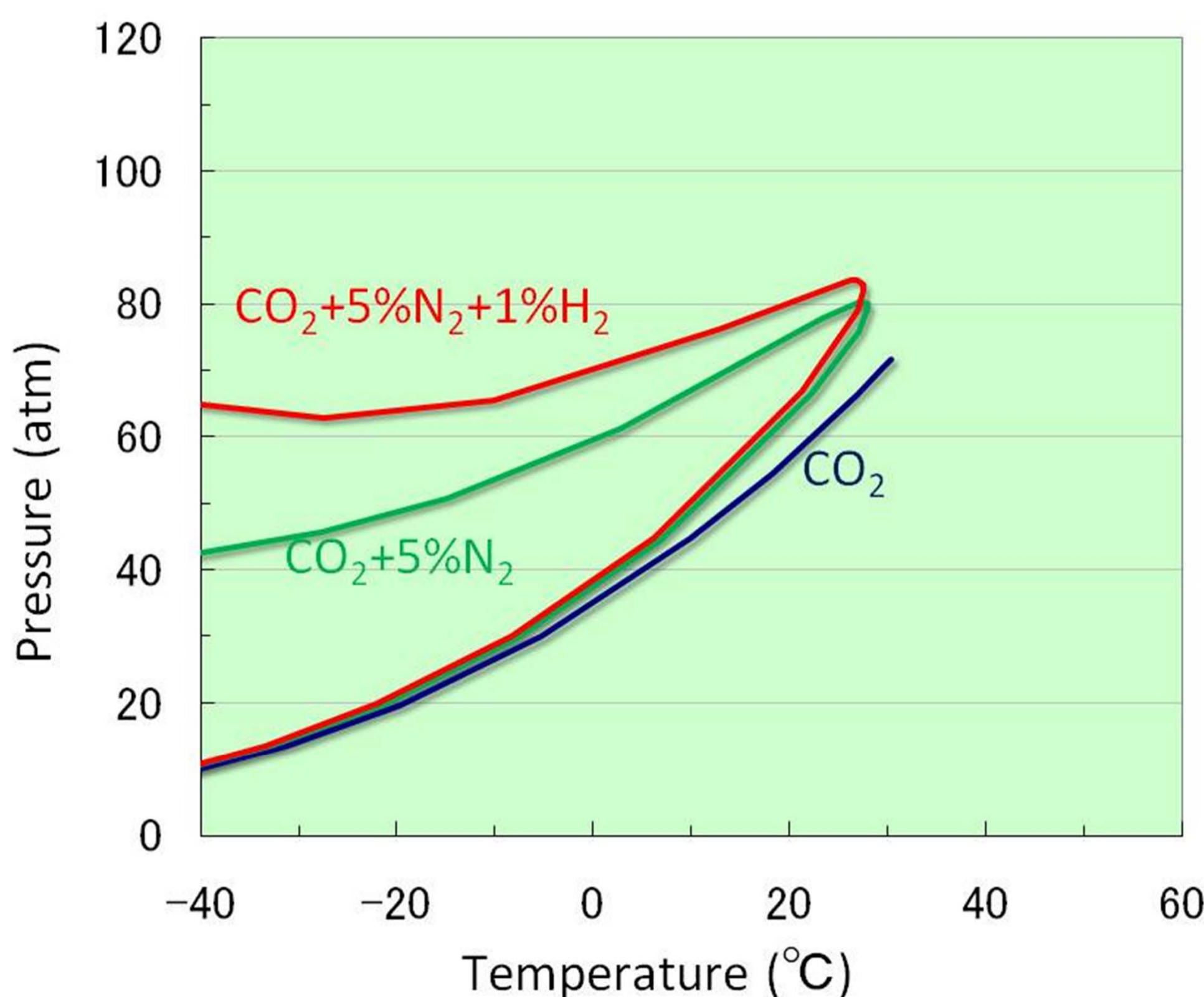


- ・パイプ材料の水素脆化は問題ないレベル
- ・水素拡散のマイクロモデル計算



パイプライン用高張力鋼の水素脆性試験

◆CO₂パイプライン



- ・輸送効率向上のため超臨界で輸送
- ・CO₂の平衡相が不純物ガス成分によって変化
- ・減圧挙動が天然ガスとは異なるため鋼管の必要靱性が上昇
- ・クラックアレスターによるき裂停止効果

Carbon Capture & Storage CO₂の高効率・安全輸送を実現するパイプラインの設計(新規テーマ)