

# CCS 用 CO<sub>2</sub> パイプラインにおけるき裂伝播制御設計のための数値モデル開発

## Development of Numerical Model for Crack Arrest Design of CO<sub>2</sub> Pipelines for CCS

学籍番号 03090890 藤井 達也

指導教員 栗飯原周二

(平成 23 年 2 月 3 日提出)

Keywords: クラックアレスター, CO<sub>2</sub> パイプライン, CCS, 不安定延性破壊, き裂伝播

### 1. 序論

進行する地球温暖化問題に対して対処することは人類にとって緊急の課題となっている。人類の活動にもなるとともに温室効果ガスである CO<sub>2</sub> が排出されていることが大きな問題となっているのだが、世界のエネルギー消費量の将来予測は人口の増加とともに増加していくことが予測されている[1]。このような中、CO<sub>2</sub> 排出量削減のための手段として太陽光発電や風力発電のような CO<sub>2</sub> を排出しないクリーンエネルギーとともに注目を浴びているのが CCS(Carbon Capture and Storage)である[2]。

1970 年代から既に米国においては EOR (Enhanced Oil Recovery)の際に注入する流体として副産物である CO<sub>2</sub> の利用が行われてきたが、CCS とは技術的に異なる部分が存在する。それは注入する CO<sub>2</sub> が人為起源のものであるということである。副産物としての CO<sub>2</sub> は既に加圧された状態であり、分離も容易であるが人為起源の場合は分離と加圧を注入前に行わなければならない。水と反応して腐食性の炭酸を形成することも分離技術の要求レベルを高める一因となり CCS 技術の課題となっている。

また CO<sub>2</sub> は天然ガスに比べて高圧ガスパイプラインの運用に際して注意しなければならない不安定延性破壊を起こしやすいという性質を持っている。これは CO<sub>2</sub> が圧力変化によって相変化を起こしやすく、減圧曲線の中で減圧の生じな

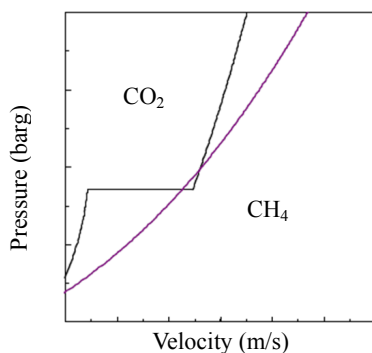


Fig. 1 Decompression curve of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> [3]

い「棚」となる部分があるからである(Fig. 1) [3]。この存在により、不安定延性破壊を起こしやすくなっている。

本研究では CCS 用にパイプラインを新規敷設するのではなく、天然ガス用のパイプラインを補強することで再利用することを考えた。そのため補強手段としてのクラックアレスターを既存の数値モデル[4]に組み込むこととした。

### 2. 数値モデル構築

パイプの変形は Fig. 2 の赤の実線で示されるように円形にはなりえないが、半径方向の変位を平均して赤の点線のように円形を保ったままアレスターを押し広げていくと簡略化してモデル内でのアレスターの表現を試みた。

これにより、押し広げられたときのアレスターの歪を算出することができるので、応力歪線図を用いて応力を求め、基盤となっている数値モデルでパイプ変形の支配方程式となっている内部仕事の式に代入した。

き裂伝播の停止にはき裂の成長に伴うエネルギー収支の式を用いているため、これも歪をもちいて表現が可能である。

その結果、アレスターによるパイプ変形への影響を Fig. 3 のように再現することができた。アレスターの装着されている 2 m 地点で変形が阻害されていることがわかる。

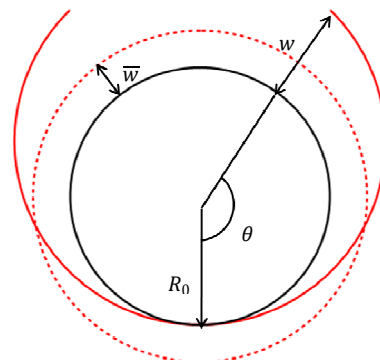


Fig. 2 Assumed pipe surface

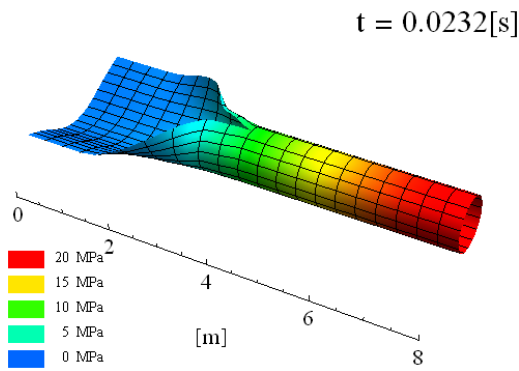


Fig. 3 Pipe deformation

### 3. 各種パラメータの影響

このように構築した数値モデルを用いてアレスタの形状や機械的特性のパラメータを変化させた。その上で初期圧力と長さを変化させ、き裂の進展と停止をまとめることで境界線を求めることを目標とした。変化させたパラメータは以下の通りである。

- (a) パイプ直径
- (b) アレスタ厚さ
- (c) パイプとのクリアランス
- (d) パイプの靱性値
- (e) アレスタの降伏応力

得られた結果をグラフにまとめる際に、横軸をパイプ直径に対する比、縦軸をアレスタの降伏応力に対する周方向応力の比としてまとめた。代表として(e)の場合の結果を Fig. 4 に示す。塗りつぶされているのがき裂が停止しなかったもの、白抜きが停止したものである。色の違いはアレスタの降伏応力の違いである。これを見るとパラメータの違いにもかかわらず、停止した場合としない場合を分ける境界線は共通のものとなっていることが分かる。

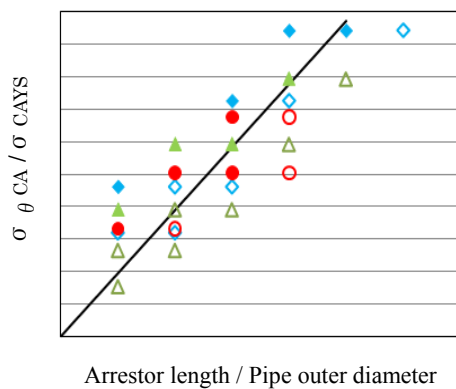


Fig. 4 P/A boundary line

### 4. CO<sub>2</sub>パイプライン用クラックアレスタの設計

天然ガス輸送で用いられていた 24 インチ及び 42 インチのパイプを CCS に再利用するに際して、必要な条件を長さや厚さに着目して評価した。その結果は Fig.5 のようになった。しかし、極端に厚い場合には技術的な困難が伴うため、厚さで停止効果を求めるより長さを重視した方がいいという評価となった。

海中のパイプラインへのクラックアレスタの装着は既存の補修技術の延長線上として考えることができるので、問題ないと考えられる。

### 5. 結論と今後の展望

今回構築した数値モデルにおいて、計算時間を短くしつつアレスタによるパイプの変形の制限を再現することができた。また、アレスタの停止能力に対する各種パラメータの影響を評価することにも成功している。

一方で整合性の検証については十分とは言えず、また経済的、技術的な観点からの評価も十分とは言えないため、今後はそれらの点も含めて研究を重ねることでより実用的な結果が得られると思われる。

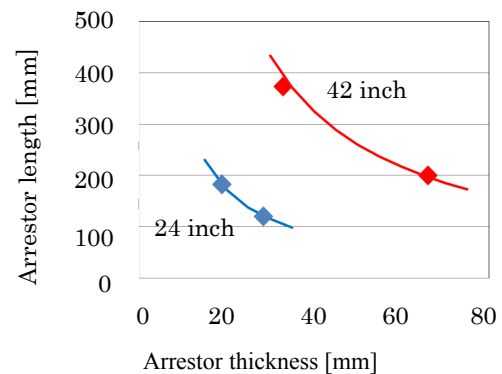


Fig. 5 Required arrestor length and thickness

### 参考文献

- [1] IEA, Key World Energy Statistics, 2008.
- [2] Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, et. al., Carbon dioxide capture and storage, Cambridge University Press, 2005.
- [3] Andrew Cosham, Robert J Eider, Fracture control in carbon dioxide pipelines – the effect of impurities, September 29-October 3, 2008.
- [4] 三澤慧：実験及び数値モデル解析による高圧 ガスパイプライン高速延性き裂伝播・停止現象に対する諸因子の影響評価，修士論文，東京大学（2010 年）。