

Flaw Tolerance 手法を用いた疲労評価手法の開発

Development of Fatigue Evaluation Using Flaw Tolerance Method

三菱重工業(株)	朝田 誠治	Seiji ASADA	Corporate Member
(株)テプコシステムズ	竹田 周平	Shuhei TAKEDA	
(一財)電力中央研究所	平澤 泰治	Taiji HIRASAWA	Member
(株)東芝	齋藤 利之	Toshiyuki SAITO	
(一社)原子力安全推進協会	齋藤 格	Itaru SAITO	
日本原子力発電(株)	堂崎 浩二	Koji DOZAKI	Member

The JSME Committee on Power Generation Facility Codes is developing a fatigue evaluation method by flaw tolerance. The ASME B&PV Code Section XI has Non-mandatory Appendix L, which provides a flaw tolerance method for fatigue evaluation when a cumulative usage factor (CUF) of a component is greater than 1.0. In order to develop a flaw tolerance method for the JSME Codes, postulated initial flaws, capability of nondestructive examination, compatibility to rules and flaw tolerance codes are discussed.

Keywords: Flaw Tolerance, Fracture Mechanics, Fatigue Evaluation, Design, Fatigue Life

1. 諸言

日本機械学会 (JSME) 発電用設備規格委員会では原子力機器に対する疲労評価手法を検討するために原子力専門委員会の下に疲労評価タスクを設けて検討を進めている。その検討の一つとして、Flaw Tolerance 手法を取り込んだ設計評価手法がある。例えば、ASME B&PV Code Section XI^[1]では Appendix L “Operating Plant Fatigue Assessment” (以降、App. L) として供用中の機器に対して Flaw Tolerance 手法を用いた評価手法を整備している。App. L では供用中に疲労累積係数 (CUF) が 1.0 を超える場合に欠陥を想定し、破壊力学評価手法を用いた機器の健全性を踏まえて検査間隔を設定して運転を継続する方法である。疲労評価タスクにおいても App. L を参考にして疲労評価への Flaw Tolerance 手法を取り込むために想定欠陥、非破壊検査能力、技術基準への適合性及び Flaw Tolerance 手法を用いた規格の検討を行った^[2]。

2. 想定欠陥

NUREG/CR-6934^[3]では、配管内の複数の位置から疲労き裂が発生すると仮定して疲労き裂の発生と進展をモデ

ル化する等価単一欠陥 (Equivalent Single Crack: ESC) という評価方法を開発した。この考え方は、近傍の位置から発生した複数の欠陥が合体することにより単一の欠陥になることから、漏洩確率が複数欠陥の場合と等価になる単一の欠陥を設定するものである。

NUREG/CR-6934 では確率論的破壊力学評価コードの pc-PRAISE を用いたが、JSME 規格での開発に対しては別の確率論的破壊力学評価コードの PEPPER-M^[4]を用いた。PEPPER-M を適用するための検証として、pc-PRAISE で評価した ESC を PEPPER-M で表 1 に示す条件で再評価した。その評価結果を PEPPER-M と pc-PRAISE による ESC のアスペクト比と $\Delta\sigma_m$ (繰返し膜応力) と $\Delta\sigma_g$ (繰返し線形及び非線形勾配応力) の比 ($\Delta\sigma_m/\Delta\sigma_g$) で整理した結果を図 1 に示す。図 1 より、以下の条件で PEPPER-M は NUREG/CR-6934 の ESC を再現できると判断した。

- 円筒用の応力拡大係数を使用
- L/a の中央値としては 20 を使用
- 配管破断条件の膜応力は流動応力の約 50% を使用
- 許容欠陥サイズ、応力拡大係数等は JSME 維持規格^[5] と ASME Sec.XI とで異なることから、以下の条件で JSME 規格用の ESC を設定した結果を表 2 に示す。
- 初期欠陥深さ : 0.5mm
- 発生時点での L/a の中央値 : 20
- 発生時点での欠陥間の距離 : ランダム
- 欠陥の発生 : 0 年目に全てのき裂が同時に発生

連絡先: 朝田誠治、〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1、三菱重工業(株)原子力事業本部原子力機器設計部 E-mail: seiji_asada@mhi.co.jp

- 応力拡大係数：JSME 維持規格の円筒解
- 疲労き裂進展速度：JSME 維持規格
- 荷重条件：設計疲労線図の 10^4 回の繰返しピーク応力強さを使用
- 破壊判定：極限荷重評価

3. 非破壊検査能力

3.1 超音波探傷試験 (UT)

非破壊検査手法の国プロジェクト⁶⁾を調査した。クラッドのない炭素鋼溶接継手、クラッド付低合金鋼溶接継手（外面及び内面 UT）、ステンレス鋼溶接継手、クラッドのないノズルコーナー（外面 UT）、クラッド付ノズルコーナー（内面 UT）及びクラッド付ノズルコーナー（鏡外面 UT）のモックアップに対する試験結果を対象とした。その結果、以下のことがわかった。

- JSME 維持規格の評価不要欠陥より大きな欠陥深さに対する欠陥検出性は概ね 100%であった。
- 欠陥長さサイジングの RMS 誤差は Sec. XI, Appendix VIII の合格基準の 19.1mm 以下であった。
- 欠陥深さサイジングの RMS 誤差は Sec. XI, Appendix VIII の合格基準の 3.2mm 以下であった。

また、解決すべき UT の課題として以下が上げられる。

- ステンレス鋼溶接継手の溶接金属部から発生・進展するき裂については、実機の発生事例が少なく、国の実証試験も行われていないことから、UT の検査性を確認するべきである。
- BWR シュラウドの溶接継手部の SCC の長さサイジングに対してフェーズドアレイ UT は良好な結果が得られたことが報告されている⁷⁾。フェーズドアレイ UT のような新しい技術をステンレス鋼及びニッケル基合金の溶接部へ適用するべきであり、その UT 検査性を把握するべきである。
- JEAC4207⁸⁾は図 2 に示すようにクラッド付ノズルコーナー部に対する外面 UT の欠陥長さの補正方法が記載されており、この方法を適用することで、UT 性能が改善され保守的な評価を行える可能性が高い。
- UT では疲労き裂と SCC とを区別するのは困難である。これを改善するためには他の非破壊検査法との組合せ、UT の高度化などを更なる検討が必要である。

3.2 渦電流探傷試験 (ECT)

国プロジェクト⁹⁻¹¹⁾において ECT の欠陥検出性及び欠

陥長さサイジングの有効性が確認された。しかしながら、深さ 5mm を超えるようなき裂の長さサイジングには適用は難しい。

4. 技術基準への適合性

材料、構造及び維持規格に対する通産省省令 62 号及び高経年化技術評価に対する省令 77 号に対して調査した。

省令 62 号第 9 条の解釈及び JSME 設計・建設規格¹²⁾は、設計段階だけでなく供用状態でも疲労累積係数が 1.0 を満足することを要求している。省令 62 号第 9 条は疲労破壊が生じないこととしている。したがって、Flaw Tolerance 手法を取り込む場合は解釈を見直す必要がある。

省令 62 号第 9 条の 2 の解釈及び JSME 維持規格では検出された欠陥が JSME 維持規格に基づき許容できる場合は継続運転を認めている。検出された欠陥を仮想欠陥に置き換えれば Flaw Tolerance 手法は供用可能である。その場合、この考え方を解釈で明記するべきである。

高経年化技術評価の審査マニュアルの低サイクル疲労¹³⁾では疲労累積係数が 1.0 を超える部位は検査結果等の追加の情報が要求されている。したがって、Flaw Tolerance 手法が認められるようにこのマニュアルを見直す必要がある。

5. Flaw Tolerance 規格

ASME Sec. XI, App. L は運転中プラントに適用できる。また、ASME Sec. VIII, Div. 3 (KD-4)¹⁴⁾は設計に対する Flaw Tolerance 手法を規定している。Flaw Tolerance 手法そのものは欠陥を想定した破壊力学評価手法であり、基本的に維持段階だけでなく設計段階でも使用できる。

Sec. XI, App. L は供用期間中に非破壊検査（基本的に UT）を基に欠陥を想定するが、Sec. VIII, Div. 3 は非破壊試験の表面検査（磁粉探傷試験、浸透探傷試験）による表面長さからアスペクト比を 1:3 として欠陥深さを設定する。そこで、JSME 維持規格の配管に対する評価不要欠陥（表 EB-2000-3）と JSME 設計・建設規格の表面検査の判定基準にアスペクト比を 1:3 として求めた深さを比較した結果を図 3 に示す。図 3 より、Sec. VIII, Div. 3 の考え方は合理的と考えられ、表面検査は建設時には基本的には適用可能なので合理的な欠陥が想定可能となる。ここで、供用期間中においても表面検査として ECT を適用して合理的な欠陥深さを設定することも可能と考えられる。

上述の運転開始時点に欠陥を想定する手法(図4)をここでは運開時欠陥想定法と呼ぶ。運開時欠陥想定法のポイントは初期に想定する欠陥寸法であり、欠陥深さの感度を調べるため、オーステナイト系ステンレス配管(外径: $\phi 406.4\text{mm}$ 、板厚 $t: 40.5\text{mm}$)を対象に欠陥深さ(a)を 3.24mm ($a/t=0.08$)と 0.5mm とし、膜応力: 曲げ応力を $1:0$ と $1:1$ に対して応力レベルを設計疲労線図の $100,000$ 回の応力振幅(281MPa)を用いてサンプル計算を実施した結果を図5に示す。想定した $100,000$ 回に対して環境疲労係数を 10 と仮定すると、初期欠陥深さ 0.5mm が想定寿命と概ね整合した。ただし、環境疲労を考慮したとしても設計疲労線図による寿命と Flaw Tolerance 手法による寿命が等価になるかはわからない。

もう一つの考え方として、 $CUF=1.0$ を疲労き裂の発生と解釈し、それ以降を疲労き裂進展評価を行って破壊力学評価を行う方法が考えられる(図6)。この方法をここでは Hybrid 法と呼ぶ。疲労き裂進展及び破壊力学評価自体は実績のあるものであり、 $CUF=1.0$ での想定欠陥が課題である。NUREG/CR-6909^[15]では、変位制御下の疲労試験において 25% 荷重低下で定義される疲労寿命は約 3mm 深さの欠陥と言われている。一つの考え方として $CUF=1.0$ での想定欠陥を評価不要欠陥とすれば基本的に非破壊検査での検出も可能であり、合理的と考えられる。

4. 結 言

疲労評価への Flaw Tolerance 手法を取り込むために想定欠陥、非破壊検査能力、技術基準への適合性及び Flaw Tolerance 手法を用いた規格の検討を行い、運開時欠陥想定法と Hybrid 法を考えた。いずれも想定する欠陥が評価でのポイントであり、引き続き検討を行う。

謝 辞

本報は、日本機械学会・発電用設備規格委員会・原子力専門委員会に設置された疲労評価タスクの成果です。ここに関係者各位に深く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components", ASME.
- [2] Asada, S., et al., "Development of Fatigue Assessment Method Based on Flaw Tolerance Concept", ASME, Pressure Vessels & Division Conference, PVP2013-97773, 2013.
- [3] Gosselin, S. R., et al., "Fatigue Crack Flaw Tolerance in Nuclear Power Plant Piping, A Basis for Improvements to ASME Code Section XI Appendix L", NRC, NUREG/CR-6934 PNNL-16192, 2007.
- [4] Machida, H., et al., "Development of Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code for Pipes with Stress Corrosion Cracks", Journal of Power and Energy Systems, Vol. 3, No.1, 2009.
- [5] 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 維持規格 (2008年版)", JSME S NA1-2008.
- [6] (独)原子力安全基盤機構, "平成16年度実用原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度に関するもの)【総括版】", 2005.4.
- [7] 平澤泰治他, "フェーズドアレイ UT 法を用いた炉内機器溶接部の探傷技術開発", 非破壊検査協会 平成13年度春季講演大会, 2001.5.
- [8] 日本電気協会, "水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程", JEAC4207-2008, 2008.
- [9] (独)原子力安全基盤機構, "平成18年度 低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証に関する事業報告書【総括版】", 2007.
- [10] (独)原子力安全基盤機構, "平成20年度 ニッケル合金溶接部の非破壊検査技術実証に関する事業報告書", 2009.
- [11] (独)原子力安全基盤機構, "平成20年度 容器貫通部狭隘部の非破壊検査技術実証に関する事業報告書", 2009.
- [12] 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2012年版)", JSME S NC1-2012.
- [13] (独)原子力安全基盤機構, "高経年化技術評価審査マニュアル 低サイクル疲労", JNES-SS-0509-03, 2009.
- [14] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 3, "Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels", ASME.
- [15] Copra, O. K., et al., "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials", NRC, NUREG/CR-6909 ANL-06/08, 2007.

(平成25年6月21日)

Table 1 Condition of Comparison Analysis

Items	Multiple cracks or ESC	Appendix L	Reproduction analysis
Crack depth at initiation	Multiple cracks and ESC	•0.02in (0.5mm)	• same as App. L
Aspect ratio at initiation	Multiple cracks	<ul style="list-style-type: none"> •Median of aspect ratio for 0.02in crack depth = 20 •standard deviation of $ln = 0.682$ •All aspect ratios on one weld is assumed to be same. 	<ul style="list-style-type: none"> •Median of aspect ratio for 0.02in crack depth: 5 and 20 (2 cases) •standard deviation of $ln = 0.518$ (Re-sampling is performed when the sampled aspect ratio is one or less) •2 cases <ul style="list-style-type: none"> - All aspect ratios on one weld is assumed to be same - Each aspect ratio is sampled at random.
Distance between cracks	Multiple cracks	•2in equally spaced	•2 cases: 2in averaged and 2in equally spaced
Initiation time of cracks	Multiple cracks and ESC	<ul style="list-style-type: none"> •Initiation time is determined by sampling the scatter of the S-N curve. •Multiple cracks are assumed to initiate at the same time. 	•100% initiation at 0 year is assumed because the initial time of cracks seems to give little impact on comparison of through-wall crack probability for multiple cracks and ESC.
da/dN	Multiple cracks and ESC	<ul style="list-style-type: none"> •Sampled based on da/dN data. •All da/dN for cracks in one weld is assumed to be the same •da/dN curve for austenitic stainless steels. $da/dN=C\Delta K^{4.000}/(1-R)^{0.50}$ [in./cycle] Median of $C=9.14E-12$, Std. deviation=$2.20E-11$ 	• same as App. L
Pipe dimensions	Multiple cracks and ESC	•OD 2in, Schedule 80 to OD 22in, Schedule 160	• same as App. L
Loading condition	Multiple cracks and ESC	<ul style="list-style-type: none"> •$2S_{ALT} = 1793MPa$ (260ksi) •60 years for 250 cycle/40years •$\sigma_M/\sigma_G = 0.0\sim 3.0$ •Bending moment on piping is not considered. 	• same as App. L
Pipe break condition	Multiple cracks and ESC	•Not clear	•2 cases: No break condition and 130MPa
Failure criteria	Multiple cracks and ESC	•Not clear	•Limit load criteria of JSME Code
Flow stress	Multiple cracks and ESC	•Not clear	• $\sigma_f = 250MPa$
Stress intensity factors	Multiple cracks and ESC	•pc-PRAISE function	•Stress intensity factor solution for plate and cylinder in the JSME Fitness-for-Service (2008 Edition)

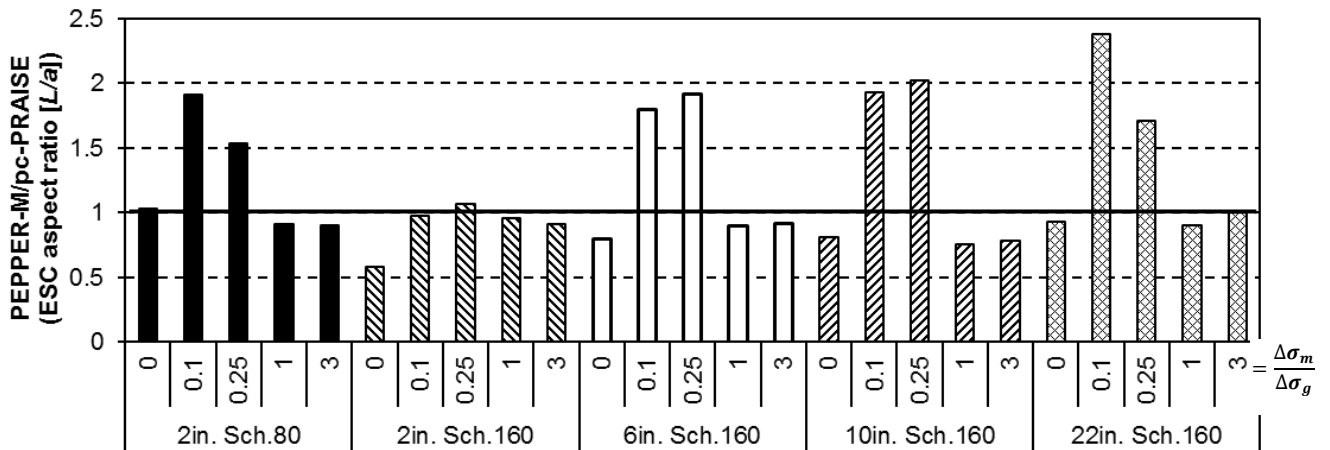


Fig. 1 Comparison of PEPPER-M and pc-PRAISE

Table 2 ESC Aspect Ratio for the JSME Code

No	Nor. Dia (A)	OD [mm]	Sch.	Ferritic Pipe			Austenitic SS (BWR)			Austenitic SS (PWR)		
				Membrane : Bending			Membrane : Bending			Membrane : Bending		
				1:0	0.5:0.5	0:1	1:0	0.5:0.5	0:1	1:0	0.5:0.5	0:1
1	50	60.5	80	11	11	17	9	11	16	10	11	15
2	50	60.5	160	11	12	25	10	12	19	11	13	15
3	100	114.3	80	14	15	23	14	15	22	14	15	25
4	100	114.3	120	15	17	26	14	16	25	15	16	29
5	100	114.3	160	15	17	27	13	15	29	14	16	30
6	150	165.2	80	17	17	25	15	17	27	15	16	28
7	150	165.2	120	17	18	28	16	17	32	15	18	23
8	150	165.2	160	17	20	39	16	18	39	16	20	35
9	200	216.3	80	18	19	29	18	39	32	19	21	31
10	200	216.3	120	20	23	37	17	20	39	18	21	33
11	200	216.3	160	18	21	44	15	17	43	16	19	41
12	300	318.5	80	22	24	38	20	21	40	20	23	40
13	300	318.5	120	18	22	40	15	18	42	16	20	45
14	300	318.5	160	14	19	44	22	13	39	12	15	36
15	400	406.4	80	22	25	41	18	21	41	19	23	41
16	400	406.4	120	15	19	40	13	30	37	13	16	37
17	400	406.4	160	13	17	45	11	13	39	10	13	19
18	500	508.0	80	20	23	40	16	19	39	20	23	37
19	500	508.0	120	14	19	43	12	15	38	13	15	35
20	500	508.0	160	13	18	54	9	11	38	9	12	35
21	600	609.6	80	17	22	42	15	17	37	15	18	36
22	600	609.6	120	14	19	46	10	13	35	11	13	34
23	600	609.6	160	12	17	54	8	10	35	9	10	36
24	650	660.4	80	18	23	44	14	16	36	14	17	33
25	650	660.4	120	14	19	47	10	11	35	10	12	36
26	650	660.4	160	11	16	55	8	9	38	9	11	37

(Note) Median of $L/a = 20$

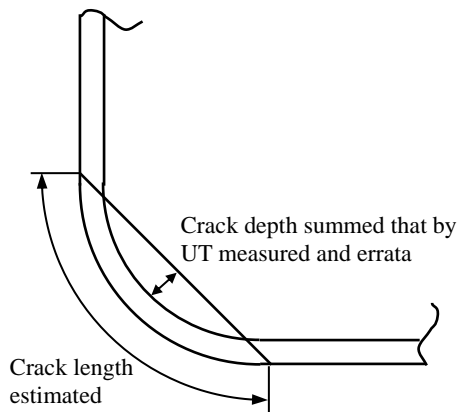


Fig. 2 Crack Length Estimation for a Nozzle Corner with Cladding^[8]

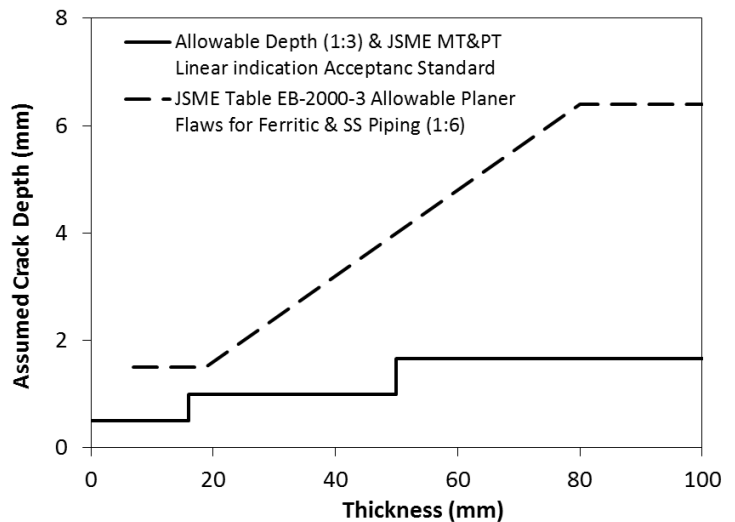


Fig.3 Comparison of Assumed Crack Depth

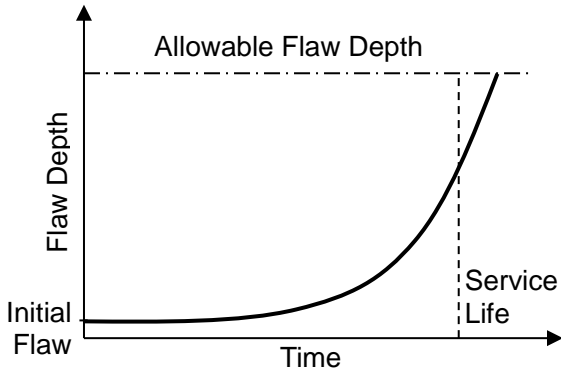


Fig. 4 Initially Assumed Flaw Case

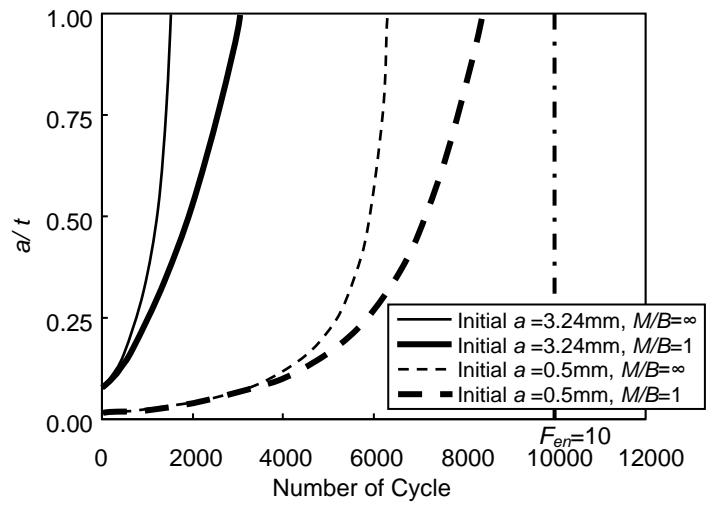


Fig.5 Sample Analysis for Initial Crack Depth

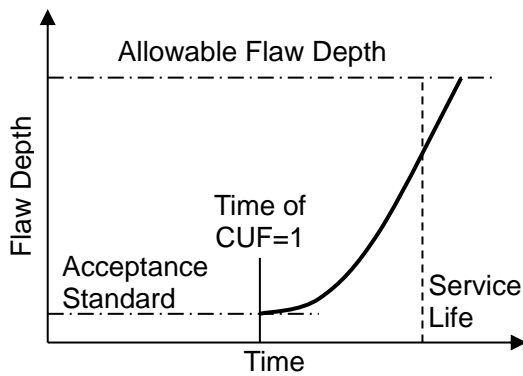


Fig.6 Hybrid Case